EMILIO CHUVIECO

FUNDAMENTOS DE TELEDETECCIÓN ESPACIAL

Segunda edición

EDICIONES RIALP, S.A.
MADRID

Primera edición: septiembre 1990
Segunda edición: julio 1995

I.S.B.N.: 84-321-2680-2
Depósito Legal: 23.304-1995

Impreso en España — Printed in Spain

Unigraf, S. A. Avda. Camara de la Industria, 38 Móstoles

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS

A mis queridos padres

PRÓLOGO

La publicación en castellano de un tratado de **Fundamentos de Teledetección** tiene en el momento actual un valor y alcance elevado. Se trata de la primera obra sobre un tema que se inscribe en el campo de las Ciencias de la Tierra, en el que están interesados profesionales muy variados: geógrafos, geólogos, biólogos, oceanógrafos y expertos relacionados con los problemas agrícolas, forestales y la ordenación del territorio. El texto está destinado a cursos que se imparten a nivel universitario y su objetivo está definido claramente por el autor: "facilitar a todos los interesados en el estudio del medio ambiente el acceso a una técnica que puede serles fructífera en la comprensión de los fenómenos que estudian".

Desde hace veinte años varios centros y grupos universitarios españoles han venido trabajando en diversas aplicaciones de la teledetección espacial. Al entrar en la década de los 90, el interés por esta técnica ha crecido notablemente. La abundante información que generan los programas espaciales y su mayor detalle, que amplía sus campos de aplicación, y el creciente número de expertos que hacen uso más frecuente de esta tecnología, son circunstancias muy propicias para el desarrollo de la teledetección.

Este interés por esta técnica se refleja en los numerosos coloquios, seminarios, conferencias y participación española en programas internacionales relacionados con diversas aplicaciones de esta disciplina. Toda esta actividad se traduce en la publicación de monografías, ponencias y trabajos de investigación. Sin embargo, hasta ahora no disponíamos de un manual que, de forma clara y concisa, respondiese a un programa de introducción a la teledetección, exponiendo con rigor y de forma práctica la técnica de la interpretación y tratamiento de imágenes espaciales. En este contexto, el profesor Chuvieco presenta una obra, escrita de forma sobria y directa, que viene a rellenar un hueco, inconcebiblemente vacío hasta ahora, en nuestra bibliografía científica.

El libro se articula en ocho capítulos. En el primero el autor, después de una breve descripción de los antecedentes históricos de esta tecnología, presenta los aspectos legales y la evolución del Derecho espacial, en lo que afecta a las actividades de la teledetección. Sigue el autor presentando los fundamentos físicos del proceso de obtención de los datos desde los principales sensores espaciales. Hay que agradecer la reducción del aparato físico matemático al mínimo, en aras de la soltura y agilidad del texto; no cae el autor en la farragosidad que, desgraciadamente, suele acompañar a este tipo de obras.

El tercer capítulo trata los sistemas espaciales: sensores y plataformas. Se hace una presentación sencilla, casi informativa, con el fin de no agobiar al lector con técnicas innecesarias para un aspirante a interpretar y tratar imágenes espaciales.

En el cuarto se dan los principios para la interpretación de imágenes y a partir de él, comenta el autor, "se desarrolla el núcleo central del libro". El capítulo siguiente se dedica al análisis visual de imágenes, que puede servir de recordatorio, en algunas partes, a los que hayan seguido un curso de foto-interpretación. No obstante, alcanza un gran valor la síntesis que se hace de los criterios a tener en cuenta por usuarios en el manejo de este tipo de documentación.

De esta forma se llega al capítulo sexto que es, en mi opinión, el más importante, ya que el lector que disponga de una formación básica en estadística e informática puede adquirir sin esfuerzo unos conocimientos buenos y prácticos sobre el tratamiento digital de imágenes. Se estudian las correcciones radiométricas y geométricas, los realces y mejoras de la imagen, las transformaciones y distintos tipos de clasificación. Los científicos que trabajan en temas espaciales encontrarán un excelente resumen, muy actualizado, donde situar su propia investigación. Todos los aspectos tratados son claves para el correcto proceder en el uso de esta técnica, su ilustración, con numerosos ejemplos, llena de vida este apartado del que el lector obtiene una idea muy clara de las posibilidades reales del tratamiento digital de imágenes espaciales.

En el capítulo séptimo se trata -muy pocos textos lo hacen-, de la verificación de las clasificaciones. En el último capítulo, se estudia la integración de la información espacial en Sistemas de Información Geográfica (SIG), con el fin de referenciarla geográficamente y hacerla más inteligible al usuario que desea disponer de información temática estadística y gráfica.

Como resumen podemos decir que el material presentado facilita a los lectores las bases necesarias para introducirse en el campo de la teledetección espacial. **Fundamentos de Teledetección Espacial** está destinado a prestar un servicio importante. El autor ha realizado un gran esfuerzo para llegar al mayor número de lectores. Creo que Emilio

Chuvieco ha logrado su propósito y aumentará, no lo dudo, el número de estudiosos de las Ciencias de la Tierra, que se introducirán, gracias a esta obra, en el fascinante campo de la interpretación de las imágenes espaciales. La observación de la Tierra desde el espacio nos ayudará a conservarla y mejorarla, y también explotar de forma más racional los recursos que nos ofrece.

Madrid, Abril de 1990

RODOLFO NÚÑEZ DE LAS CUEVAS
Prof. Dr. Ingeniero Geógrafo
Presidente de la Sociedad Española de Cartografía, Fotogrametría y Teledetección

PRESENTACION

Mi primer contacto con la teledetección surgió en una conversació callejera con mi buen amigo Juan Antonio Cebrián, enfrascado e aquellos años en tareas de cartografía asistida por ordenador. Me habl entonces de una nueva técnica, que a su juicio sería de gran trascendencia para un mejor conocimiento y conservación de los recursos de nuestr frágil planeta. Gracias a su consejo, y al refrendo de una beca en e Instituto de Geografía Aplicada del CSIC, inicié los trabajos de mi tesi doctoral, hace ahora ocho años. Desde entonces hasta el moment presente me he dedicado, casi exclusivamente, al estudio de esta técnica creciendo progresivamente mi interés por su conocimiento, ante e amplio panorama de sus aplicaciones medio ambientales.

A muchos parecerá un tanto pretencioso redactar un tratado con ta breve periodo de formación. Posiblemente no les falte razón, si bie conviene señalar que esta obra se ha escrito no desde la perspectiva d quien ha llegado a una cúspide, sino más bien del aprendiz en camino que intenta evitar a otros sus propios trompicones.

El título incluye la palabra Fundamentos bien a propósito. No s pretende agotar la técnica; antes al contrario, iniciar su estudio, allana el sendero de quienes contemplen en ella una nueva fuente de información sobre el espacio que nos rodea. Por esta razón, el texto se centr sobre los aspectos de interpretación, dejando las aplicaciones para u futuro volumen.

Con objeto de facilitar la lectura se han adoptado una serie d convenciones en la notación que incluye el texto. Las fórmulas se citar entre corchetes [ ] con dos números: el primero hace referencia a capítulo en donde se incluye y el segundo al orden dentro de es capítulo. De forma similar se citan las figuras, entre paréntesis ( ) y precedidas de la indicación fig., también con dos números. Aquellas qu aparecen con un asterisco * indican fotografías en color, y están situada en el encarte central del libro. Por último, en ocasiones se sugiere a lector acudir a otros capítulos para recabar información adicional. Est se hará indicando la numeración de ese capítulo entre paréntesis ( ). A final de la obra, se han incluido un glosario de términos y un índic temático, que ayudarán al lector a asimilar su contenido.

Ésta, como cualquier otra obra universitaria, no es labor exclusiva de quien la firma. La aportación de algunas personas e instituciones resulta tan destacada, que sería injusto omitir su referencia en estos párrafos. En primer lugar, es de justicia recordar a quienes contribuyeron directamente a mi formación en este campo. El centro de investigación UAM-IBM me acogió con todo interés en mis primeras, y torpes, andaduras. Después fué el Instituto de Geografía Aplicada del CSIC, la Universidad de California en Berkeley, y la Universidad de Nottingham. En estas instituciones, el apoyo de los profesores Casas Torres, Núñez de las Cuevas, Ortí, Ramírez, Congalton y Mather ha sido muy destacado. A ellos hay que sumar las sugerencias de Victoriano Moreno, Julio Uboldi, Vicente Caselles, Joaquín Meliá y Javier Martínez Vega, que han contribuido sustancialmente a mejorar la calidad final del texto. En los aspectos materiales, merecen especial mención Fernando Moreno, autor de buena parte de las fotografías, Enrique Gaetner y Javier Salas.

Junto a las aportaciones de estos profesionales, también resulta obligado mencionar el papel que juegan, en la gestación y desarrollo de este trabajo, mis propios alumnos. Como profesor universitario, los alumnos son la razón última de estas páginas y marcan su orientación didáctica. La actividad docente en los cursos del programa de Doctorado, que imparte nuestro Departamento, ha permitido limar muchos conceptos, hacerlos más asequibles. En mi opinión, los especialistas caemos con bastante frecuencia en un prurito academicista, que -en aras de un rigorismo científico- sacrifica la claridad y didáctica de los contenidos, dificultando, en última instancia, su acceso a los neófitos. Espero no haber incurrido en esta postura, ya que la función principal de este libro es la enseñanza de la teledetección, a distintos niveles y en diversos ámbitos científicos, tanto en España como en los queridos países latinoamericanos.

Mi agradecimiento también a la editorial Rialp, que acogió de buen gusto la idea de llevar a cabo este volumen, mostrando en todo momento gran interés por su desarrollo.

No puedo concluir estos párrafos, sin hacer especial mención al Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá, donde he trabajado en los últimos cinco años, y en donde siempre he encontrado un estímulo intelectual y un entorno de sincera camaradería. Buena parte de ese inestimable ambiente se debe a su director, el profesor Sancho Comins, modelo del hacer, del hacer hacer, y del dejar hacer. A él se deben buena parte de las cualidades que pueda contener esta obra.

Alcalá de Henares, Mayo de 1990

EMILIO CHUVIECO SALINERO

1. NOCIONES INTRODUCTORIAS

1.1. DEFINICIÓN Y OBJETIVOS

Volar ha sido, desde épocas muy remotas, uno de los sueños má intensamente anhelados por la Humanidad. Pese a la persistencia de intento, sólo en fechas recientes el hombre ha dispuesto de los medio técnicos necesarios para hacer realidad este deseo. Desde ese momento el ritmo de la innovación tecnológica ha sido vertiginoso, lo que nos h permitido enriquecer notablemente nuestro conocimiento sobre el Planet y sus habitantes.

Uno de los principales acicates de esta aventura aérea ha sido l búsqueda de una nueva visión de los paisajes terrestres. El afán d remontar la limitada perspectiva de la visión humana es evidente y desde los inicios de la aeronáutica, llegando a ser, hoy en día, una piez clave de la investigación espacial.

Esa observación remota de la superficie terrestre constituye el marc de estudio de la teledetección. Este vocablo es una traducción latina de término inglés *remote sensing*, ideado a principios de los 60 para designa cualquier medio de observación remota, si bien se aplicó fundamental mente a la fotografía aérea, principal sensor de aquel momento. E sentido amplio -y así se tratará en este libro-, la teledetección no englob sólo los procesos que permiten obtener una imagen desde el aire o e espacio, sino también su posterior tratamiento, en el contexto de un determinada aplicación. En esta obra se restringe el análisis a aquello medios de teledetección montados sobre plataformas espaciales, de ahí e adjetivo que completa el título. Queda relegada, por tanto, la fotografí aérea clásica, para centrarnos en el estudio de técnicas más recientes d observación terrestre.

Esto no implica, en modo alguno, un menosprecio hacia la fotografi aérea, que sigue siendo la técnica de teledetección más empleada, y es en muchos casos, un auxiliar imprescindible para estos medios d

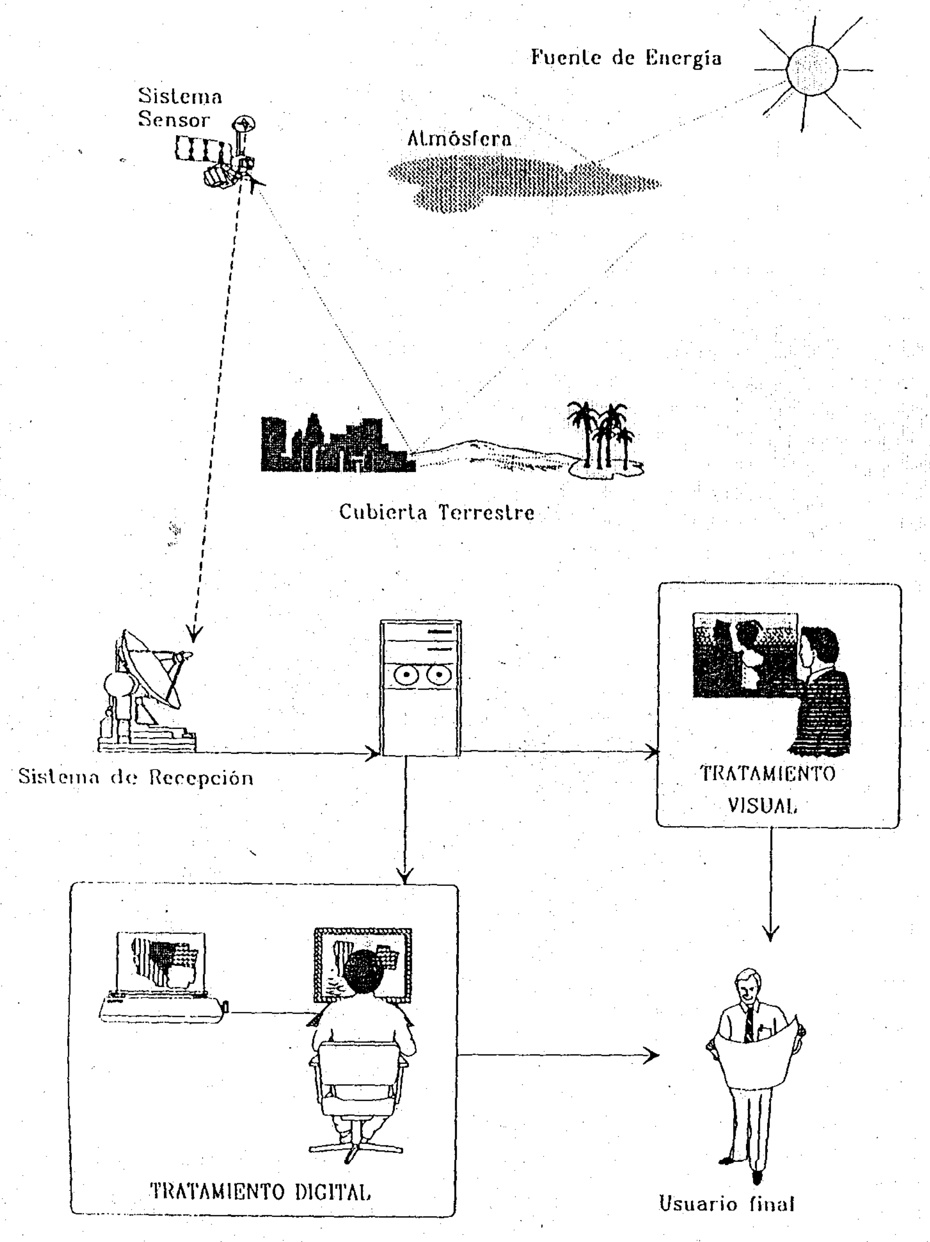


Fig. 1.1 - Componentes de un sistema de teledetección

observación espacial. Se asume, no obstante, que el lector está familiarizado con las técnicas de foto-interpretación, ya que ha venido siendo materia común en la mayor parte de las facultades con orientación medio ambiental. De esta forma, podremos centrarnos en los nuevos medios de teledetección, aún carentes de suficiente bibliografía en nuestra lengua, en contraste con el gran interés que suscitan entre diversos expertos en ciencias de la Tierra: geógrafos, biólogos, edafólogos, forestales, agrónomos, oceanógrafos o cartógrafos, hacia quienes esta obra va dirigida.

Si hemos definido la teledetección espacial como aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, estamos suponiendo que entre la Tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, ya por emisión propia. A su vez, es preciso que ese haz energético recibido por el sensor se transmita a la superficie terrestre, donde la señal detectada pueda almacenarse y, en última instancia, ser interpretada para una determinada aplicación. Como antes comentamos, ese análisis de la información recibida se incluye también -en sentido amplio- dentro del estudio de la teledetección, aunque esté más allá de los procesos de adquisición propiamente dichos. No obstante, constituye un capítulo fundamental para nuestros intereses, por cuanto esta obra se dirige más a presentar los fundamentos para las distintas aplicaciones, que los aspectos técnicos en sí mismo considerados.

En definitiva, un sistema de teledetección espacial, tal y como se concibe en la presente obra, incluye los siguientes elementos (fig. 1.1):

(i) Fuente de energía, que supone el origen del flujo energético detectado por el sensor. Puede tratarse de un foco externo al sensor, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético emitido por éste (teledetección activa). La fuente de energía más importante, obviamente, es la energía solar.

(ii) Cubierta terrestre, formada por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas, que reciben la señal energética procedente de (i), y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.

(iii) Sistema sensor, compuesto por el sensor, propiamente dicho, y la plataforma que lo sustenta. Tiene como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.

(iv) Sistema de recepción-comercialización, en donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato

apropiado, y, tras las oportunas correcciones, se distribuye a los intérpretes.

(v) Intérprete, que analiza esa información -normalmente en forma de imágenes analógicas o digitales-, convirtiéndola en una clave temática o cuantitativa, orientada a facilitar la evaluación del problema en estudio.

(vi) Usuario final, encargado de analizar el documento fruto de la interpretación, así como de dictaminar sobre las consecuencias que de él se deriven.

El símil de la visión humana puede ayudar a entender el significado de estos componentes. El ojo humano (iii) recibe un haz energético procedente de los objetos exteriores (ii) por reflejo de la luz solar (i). Esa señal se transmite al cerebro (iv), que es capaz de formar una serie de imágenes sobre el mundo real que le circunda. El individuo que observa es a la vez intérprete (v) y usuario final (vi) de la imagen detectada, lo que le permite tomar decisiones sobre su propio comportamiento. En otras palabras, la visión humana forma un sistema de teledetección, muy sofisticado por cierto, puesto que nos permite caracterizar con mucho detalle los objetos que observamos.

Sin embargo, nuestra percepción visual presenta también algunas limitaciones. Por un lado, se restringe por la sensibilidad espectral de nuestras células sensoras, que sólo nos permiten apreciar un determinado tipo de energía, denominado, por esa razón, espectro visible. Otras formas energéticas, como el calor, no nos son directamente perceptibles, por lo que parece conveniente contar con unos "ojos artificiales" que amplíen nuestras propias posibilidades. Otra restricción de la visión humana hace referencia a la perspectiva de observación. El campo de visión del hombre está limitado a su propia estatura, o a la que puede adquirir desde observatorios naturales. En cualquier caso, se trata de una perspectiva oblicua, y de pequeño radio de acción, lo que dificulta observar fenómenos muy extendidos como inundaciones o incendios, donde las estimaciones directas son siempre imprecisas. Para paliar ambas limitaciones, el hombre ha acudido a sensores artificiales, montados sobre plataformas situadas a una cierta altitud. Con ellos, se tiene acceso a tipos de energía no visibles (ultravioleta, infrarojo, micro-ondas), y, además, desde una nueva perspectiva, vertical y panorámica. Esta nueva información expande notablemente nuestro conocimiento del medio que nos rodea, facilitando nuestra interpretación de los múltiples procesos que afectan al Planeta.

El creciente empleo de distintos sensores de observación terrestre está originando no sólo una enorme cantidad de información, sino también

una nueva forma de estudiar la superficie terrestre. La teledetección junto a las técnicas anejas de almacenamiento y proceso de la infor mación geográfica, permiten disponer de una masa ingente de dato sobre el territorio, algunos de ellos accesibles en tiempo real. Par aprovechar con fruto estas técnicas, el recurso a los ordenadore electrónicos resulta casi inevitable. Una vez salvado el necesari entrenamiento, estos equipos amplían notablemente nuestra capacidad d análisis: ayudan a elaborar una interpretación rápida y económica de problema bajo estudio, a la vez que permiten abordar análisis integrados difícilmente viables con otros medios tradicionales. En definitiva, gracias a estos recursos, podemos cada día poner más el énfasis sobre e planteamiento de modelos y el análisis de resultados -tareas éstas dond la inteligencia humana resulta insustituible-, librándola de otras labore mecánicas (acopio y ordenación de datos), que han consumido tradicio nalmente las mejores fuerzas del investigador.

De acuerdo con el esquema antes enunciado, esta obra engloba e estudio de los distintos elementos que forman un sistema de teledetec ción. En primer lugar, se analizan los procesos que permiten obtener la imágenes espaciales: principios físicos de transmisión de la energía (cap 2), y técnicas de adquisición de imágenes, con un breve repaso de lo principales proyectos de observación terrestre (cap. 3). El resto de lo capítulos se centran en la interpretación -tanto visual como digital- d las imágenes, punto crucial para los interesados en las aplicaciones d esta técnica (cap. 4 a 6). La verificación de los resultados obtenidos e esa fase se aborda en el capítulo 7, para concluir la obra con un capítulo a modo de epílogo, dedicado al estudio de la conexión entre la teledetec ción y los Sistemas de Información Geográfica, dentro de un plan teamiento integrado del análisis medio ambiental. Estos capítulos s preceden por unos comentarios sobre el pasado, presente y desarroll previsible de la teledetección, incluyendo algunos aspectos legales qu pueden ayudar a enmarcar conflictos internacionales derivados de est observación terrestre.

1.2. UN POCO DE HISTORIA

La teledetección es una técnica aplicada, y como tal muy dependient del estado de desarrollo tecnológico existente en cada momento. Po cuanto que en ella se conjugan aspectos muy variados -óptica y detec tores del sensor, vehículo que lo sustenta, sistemas de transmisión equipos de tratamiento, etc-, las formas de teledetección han variad ostensiblemente en las últimas décadas (fig. 1.2). El crecimiento ha sid

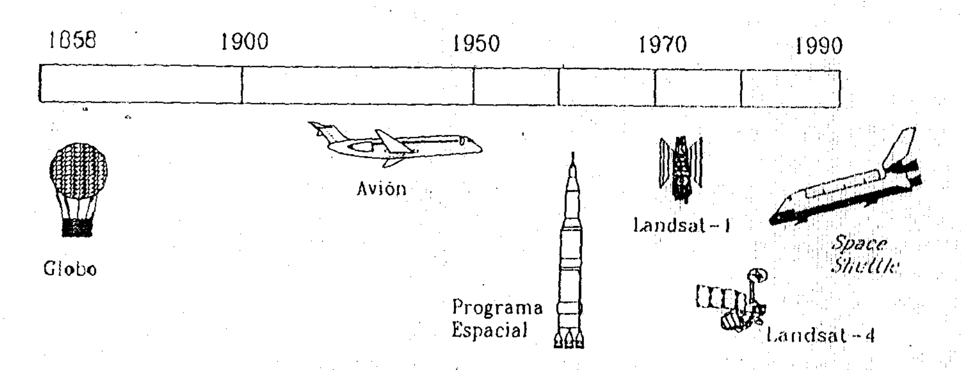


Fig. 1.2 - Evolución histórica de los sistemas de teledetección

realmente vertiginoso, facilitando una progresión muy notable, tanto en la cantidad, como en la variedad y calidad de la información disponible para campos científicos muy variados.

Las primeras experiencias de teledetección se remontan a 1859, cuando Gaspar Felix de Tournachon obtiene las primeras fotografías aéreas desde un globo cautivo (Hyatt, 1988). Al año siguiente, James Wallace repite la experiencia sobre la ciudad de Boston, poniéndose en evidencia el interés de la nueva perspectiva aérea para un conocimiento más detallado de la organización urbana.

En los años siguientes, se asiste a un importante desarrollo de la observación fotográfica desde avión, gracias a los importantes progresos realizados en ópticas y emulsiones. En 1909, Wilbur Wright adquiere la primera fotografía aérea, abriendo el camino a una larga historia de observación desde plataformas remotas. La primera cámara aérea propiamente dicha se desarrolla durante el primer conflicto bélico, concretamente en 1915, por J.T.C.Moore-Brabazon. La importancia estratégica de este escrutinio queda pronto en evidencia, desarrollándose notablemente las técnicas de adquisición y procesado fotográfico (Brookes, 1975).

Será, no obstante, en la Segunda Guerra Mundial cuando se produzca un notable desarrollo de las técnicas de teledetección aérea. El progreso se orienta a mejorar la óptica de las cámaras de reconocimiento, así como las emulsiones utilizadas (de esta época proceden las primeras películas en infrarrojo, desarrolladas por *Kodak Research Laboratories*). Asimismo, se introducen nuevos sensores, como el rádar, y se mejoran los

sistemas de comunicación. Por otro lado, la aeronáutica prosper notablemente, lo que confiere mayor estabilidad a las plataformas d observación.

Todas estas innovaciones se aplican posteriormente a usos civiles, l que muestra las múltiples aplicaciones de esta exploración aérea para mejor conocimiento y control de los recursos naturales. En los años d posguerra se mejoran los sistemas rádar, introduciendo el rádar later aerotransportado (SLAR), y se ponen a punto los sensores térmicos d barrido.

A finales de los años 50, el desarrollo de los sistemas de navegació permite concebir los primeros ingenios espaciales. La denominada "guerr fría" tiene en el espacio uno de sus objetivos preferentes, alentándos desde uno y otro bando, una intensa investigación en estos temas. A lanzamiento del satélite soviético Sputnik, en 1957, le siguen una larg serie de misiones civiles y militares, que han permitido no sólo l exploración de nuestro Planeta, sino también de la Luna y los planet vecinos.

Poco después de iniciarse esta "carrera espacial", se pone en evidenc el interés de usar estas plataformas para adquirir valiosos datos de l superficie y atmósfera terrestre. En 1960, la NASA pone en órbita primer satélite de la serie TIROS, pionero de múltiples misiones d observación meteorológica, que han permitido un conocimiento y contr más ajustados de las condiciones atmosféricas, evitando, o paliando menos, graves catástrofes naturales.

Junto a estos satélites artificiales, en los años sesenta también impulsaron misiones tripuladas, dedicadas a la exploración del Sisten Solar y la conquista de la Luna. Además de estos fines, aportaro asimismo valiosas imágenes sobre la superficie terrestre, que sirvieron c acicate para planear proyectos dedicados exclusivamente a esta finalida Las primeras fotografías espaciales se tomaron por Alan B. Shepard, d forma espontánea y un tanto rudimentaria, durante una de las misione del Mercury (1961). En los años siguientes, se continuaron tomand fotografías desde naves tripuladas, aunque será la misión Gemini-Titá (1965) la que incluya los primeros experimentos formales de fotograf espacial, en este caso para usos geológicos y meteorológicos (experimer tos S005 y S006, respectivamente).

Alentada por los brillantes resultados de estos ensayos, la NAS continúa proyectando este tipo de observaciones. Durante las mision

del Apollo-6 y Apollo-7 se adquieren diversas series de fotografías verticales, mientras en la del Apollo-9 (1969) se aborda el primer experimento multi-espectral, denominado S065, compuesto por cuatro cámaras Hasselblad con distintos filtros.

Todas estas experiencias, junto al bagaje aportado por los satélites meteorológicos, hacen concebir a la NASA proyectos dedicados exclusivamente a la cartografía y evaluación de los recursos naturales. El 23 de julio de 1972 supone la culminación de esta tendencia, con el feliz lanzamiento del primer satélite de la serie ERTS (*Earth Resources Technollogy Satellite*). Este proyecto, bautizado Landsat con la puesta en órbita del segundo satélite en 1975, resulta el más fructífero hasta el momento para aplicaciones civiles de la teledetección (3.5.1). A partir de la serie Landsat, el interés de la comunidad científica internacional por esta técnica ha crecido exponencialmente, contándose por miles los estudios desarrollados -en muy variados países del mundo- sobre las imágenes proporcionadas por estos satélites (fig. 1.3).

A la serie Landsat seguirán otros proyectos específicamente diseñados para la observación medio ambiental. Los más conocidos son el laboratorio espacial tripulado Skylab (1973), el satélite oceanográfico Seasat (1978), el de investigación térmica HCMM (1978) -todos ellos propiedad de NASA-, el satélite francés SPOT (1986), el japonés MOS-1 (1987), el indio IRS-1 (1988), y los rusos Soyuz y Salut. Actualmente están muy avanzados los proyectos del satélite europeo ERS-1 y el canadiense Radarsat, lo que indica el interés que esta técnica suscita en muy variados contextos. Mención aparte merecen las numerosas misiones del transbordador espacial norteamericano (*Space Shuttle*) que ha revitalizado el papel de los sensores fotográficos. Las experiencias con cámaras de alta resolución (cámara métrica y cámara de gran formato), no pueden ser más alentadoras (3.3.1).

1.3. DESARROLLO ACTUAL

Pese a la juventud de esta tecnología, son ya numerosos los centros de producción, enseñanza e investigación que trabajan activamente en este campo. Las tendencias presentes parecen confirmar un creciente desarrollo de su aplicación, tanto en países desarrollados como en aquellos con una situación tecnológica más deficiente.

De acuerdo con Curran (1985), podemos distinguir cuatro estadios en el desarrollo de cualquier disciplina. El primero vendría dado por un



Fig. 1.3 - Imagen Landsat de la ciudad del Cairo (Cortesía EOSAT)

período preliminar de crecimiento, con una tradición investigadora escasa, y pocas o ninguna asociación dedicada a su estudio. El segundo, corresponde a un período de crecimiento exponencial, doblándose el número de publicaciones a intervalos regulares, a la vez que se establecen unidades de investigación. En el tercer nivel, el índice de crecimiento comienza a declinar y, aunque no existan importantes aumentos en el volumen de especialistas, el nivel de especialización y controversia aumenta. El último período se caracteriza por un nivel de crecimiento cercano a cero: las unidades de especialización y sociedades profesionales se consolidan y la ciencia adquiere madurez.

Dentro de este esquema, la teledetección ocupa estadios muy diversos según los países. "En la mayor parte de los países en desarrollo se

encuentran en el primer nivel, la mayor parte de los países europeos en el segundo, y Estados Unidos comienza a entrar en el tercer estadio" (Curran, 1985, p. 7).

Parece razonable pensar que nuestro país seguirá esta misma trayectoria, por lo que el análisis de la situación en Estados Unidos puede arrojar luces sobre las tendencias futuras[1]. De acuerdo a un informe sobre la privatización del proyecto Landsat remitido al Congreso de Estados Unidos (OTA, 1984), existían en ese país a principios de los 80, más de 50 organizaciones comerciales dedicadas al empleo de la teledetección espacial. En más de 18 Estados se utilizaban datos Landsat para la construcción de sus sistemas de información territorial, y sólo en 2 no se habían constatado estudios realizados a partir de imágenes de este satélite. Con datos de 1977, este mismo informe registraba 590 profesores e investigadores universitarios trabajando en teledetección. En ese mismo año se ofrecían 137 cursos sobre esta técnica en universidades americanas, con un total de 2.906 inscritos. La situación actual supera con creces estos números, cifrándose en 549 los cursos ofrecidos en teledetección por más de 300 departamentos de 125 universidades (Kiefer, 1989)[2]. Entre 1964 y 1984 se desarrollaron un total de 359 tesis doctorales sobre la materia, lo que da idea del importante desarrollo de la investigación en esta línea (Merideth y Sacks, 1986).

En cuanto a actividades profesionales, la mayor parte de las iniciativas se canalizan a través de la *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, que cuenta con más de 6.000 afiliados, divididos en 23 regiones y 5 divisiones de aplicación. Esta asociación publica mensualmente la revista *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, una de las más prestigiosas en este campo. Otras instituciones de gran actividad son los diversos centros NASA (especialmente el centro espacial *Goddard*, en Maryland, y el *Ames Research Center* y *Jet Propulsion Laboratory* en California). Entre los departamentos universitarios, cuenta con gran tradición el *Environmental Research Institute of Michigan* (ERIM), el *Laboratory for Applications of Remote Sensing* (LARS) de la Universidad de Purdue (Indiana), el *Institute for Environmental Studies*

[1] Una información más completa sobre las actividades de teledetección en distintos países puede obtenerse en: Carter (1986), Cracknell y Hayes (1986), y Hyatt (1988). Una relación de algunas entidades citadas en este epígrafe puede consultarse en el apéndice I.

[2] Jensen y Dahlberg (1983) cifraban en 691 los cursos de teledetección ofrecidos en universidades americanas, incluyendo los relativos a fotografía aérea, más del 80 % de los cuales se dictaban en universidades públicas. Los departamentos más activos, en esta docencia, eran los de Geografía (36 %), Geología (14,8 %) e Ingeniería Civil (8 %).

de la Universidad de Wisconsin-Madison, y la *Remote Sensing Unit* de la Universidad de California en Santa Barbara, por citar sólo los más significativos. Desde el punto de vista comercial, la empresa EOSAT se encarga actualmente de la distribución de los productos Landsat, con apoyo de algunos centros gubernamentales, como el *EROS Data Center*, NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) y NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) para mantener la red de estaciones receptoras.

En Canadá la situación también es muy favorable, contando con una institución nacional, el *Canadian Center for Remote Sensing*, que cuenta con diversos centros regionales y coordina la actividad docente e investigadora en teledetección. También en este país ejerce su actividad una sociedad profesional, la *Canadian Remote Sensing Society*, dedicada a la organización de congresos periódicos y la publicación de una interesante revista, la *Canadian Journal of Remote Sensing*.

En el contexto europeo, tal vez el Reino Unido ha sido el país más interesado hasta el momento por la investigación aplicada en esta técnica. Pueden citarse cincuenta instituciones que estén trabajando activamente sobre ella (Bullard y Dixon, 1985), con una producción bibliográfica muy significativa: varios manuales universitarios, diversas publicaciones científicas (*International Journal of Remote Sensing*, *NRSC Newsletter*), y una sociedad, la *Remote Sensing Society*, muy activa en tareas de enseñanza y difusión: organiza anualmente, desde 1974, un congreso internacional en distintas universidades inglesas. El *National Remote Sensing Center*, es la institución líder en el fomento y desarrollo de la investigación (Carter, 1986).

Las autoridades francesas han realizado un gran esfuerzo en este campo, que llevó al lanzamiento del primer satélite SPOT, en 1986, continuado con el segundo satélite de la serie en febrero de 1990 (3.5.2). El proyecto fue desarrollado por el *Centre National d'Etudes Spatiales* (CNES), con una pequeña colaboración de la *Swedish Space Corporation*. La explotación comercial de las imágenes adquiridas por este satélite se encarga a una empresa privada, *SPOT Image*, que cuenta con distribuidores en todo el mundo. En el terreno de las aplicaciones, el *Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale* (GDTA), con sede en Toulousse, ha impulsado la realización de cursos internacionales y la coordinación de las distintas instituciones gubernamentales con interés en teledetección. La producción científica no es, aún tan sustancial como en el caso de Estados Unidos o el Reino Unido, si bien está creciendo notablemente en los últimos años.

Otros países europeos han mostrado gran interés en la aplicación de esta técnica para un mejor conocimiento de sus problemas medio ambientales. En Holanda, la actividad docente e investigadora del *Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences* (ITC), con sede en Enschede, ha sido muy destacada, tanto en el campo de la docencia como de la investigación (*ITC Journal*). En la R.F. Alemana, Bélgica, Italia y los países escandinavos existen numerosos centros dedicados a este tipo de investigaciones. La Comunidad Económica Europea, como conjunto, pretende impulsar las aplicaciones de la teledetección especialmente a través del proyecto *CORINE-Land Cover*, y del programa de predicción de cosechas. Además, se están realizando trabajos en cartografía de la cubierta del suelo, inventarios forestales y de pastizal, y estudios regionales sobre áreas menos favorecidas. La mayor parte de estas iniciativas parten del *Institute for Remote Sensing Applications*, creado, dentro del centro común de investigación de Ispra, para desarrollar distintas aplicaciones de la teledetección. La sola existencia de este instituto, demuestra el interés de la Europa Comunitaria para impulsar las aportaciones que esta tecnología puede brindar a los estados miembros.

Por no ampliar excesivamente esta relación, podemos concluir citando otros países en donde la teledetección espacial resulta una técnica de notable implantación. Este es el caso de Japón, Brasil y la India, empeñados en el desarrollo de proyectos espaciales propios, así como de la Unión Soviética, con una larga trayectoria en esta disciplina, aunque poco conocida para los países occidentales. Las principales organizaciones son la *National Remote Sensing Agency*, localizada en Hyderabad; el *Remote Sensing Technology Center* (RESTEC), situada en Tokio; y el *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* (INPE), emplazado en Sao Jose dos Campos.

Tras repasar el contexto internacional, resulta conveniente detenernos sobre el estado de la teledetección en nuestro país. En ésta, como en otras tecnologías de punta, el desarrollo es desgraciadamente escaso y lento, pese a que algunos de nuestros investigadores realizaran estudios pioneros en esta línea, ya a mediados de los años setenta (Núñez, 1976). En el momento presente, existe un gran interés en la comunidad científica, pero aún no se ha consolidado como una técnica suficientemente difundida. Sólo se constata la actividad de pequeños grupos de estudiosos, mas o menos aislados entre sí, y, casi siempre, en desconexión con los organismos o empresas interesadas en obtener productos temáticos. Prueba de lo dicho, es la exigua presencia de la teledetección en los planes de estudio universitarios, y la escasísima oferta de programas de

especialización. Todo esto contrasta con el interés general por la técnica, que se registra en la masiva asistencia a cursos divulgativos, o en la adquisición de equipos sofisticados por parte de empresas, departamentos universitarios o institutos de investigación, que inician su trabajo en esta línea.

Un paso esperanzador hacia la consolidación de esta técnica en nuestro país, representa la puesta en marcha de la Asociación Española de Teledetección, creada en 1989 tras cuatro años de actividades como grupo de trabajo. Entre sus logros cuenta la organización de tres congresos nacionales (Barcelona, Valencia y Madrid), y la publicación de un boletín informativo periódico. Pese a ello, sus actividades aún resultan bastante incipientes. En similares términos cabe expresarse en lo que se refiere a la Sociedad Española de Cartografía, Fotogrametría y Teledetección, organizadora de cursos y seminarios sobre estas técnicas.

Tal vez una de las principales rémoras para impulsar el desarrollo de la teledetección en España, sea la inexistencia de un centro nacional, similar al NRSC inglés o al GDTA francés, que coordine los esfuerzos individuales y ponga en contacto a los expertos con el usuario final del producto. Los centros más destacados, sin pretender ser exhaustivo, son los dedicados a la producción cartográfica (Instituto Geográfico Nacional, Institut Cartogràfic de Catalunya, Junta de Andalucía), a la investigación (Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Instituto Tecnológico y Geominero, Instituto de Economía y Geografía Aplicada, Instituto de Geologia Jaume Almera), o a la docencia universitaria (Dpto. de Geografía de la Universidad de Alcalá, Dpto. de Termodinámica de la Universidad de Valencia), además de algunas empresas de reciente creación.

1.4. ASPECTOS LEGALES DE LA TELEDETECCIÓN

La teledetección, como ya hemos indicado, supone la observación exterior de la superficie terrestre. El satélite, como es obvio, no ajusta su órbita a las fronteras nacionales, sino que adquiere imágenes de todo el globo. Esta adquisición de datos sobre un territorio soberano, puede implicar una violación de su espacio aéreo, además de poner en evidencia recursos de un país que podrían ser explotados abusivamente por terceros. Por esta razón, se ha puesto de manifiesto la necesidad de regular jurídicamente las actividades de teledetección espacial.

El Comité de Naciones Unidas para el Uso Pacífico del Espacio Exterior ha intentado desarrollar unos principios legales que salven las tensiones entre Estados observados y observadores. El inicio de este proceso se encuentra en el tratado sobre las actividades de exploración del espacio, firmado en 1967. Allí se señalaba que "...el espacio exterior, incluso la Luna y otros cuerpos celestes, no podrá ser objeto de apropiación internacional por reivindicación de soberanía, uso o ocupación, ni mediante ningún otro medio" (*Treaty on principles goberning the activities of States in the exploration and use of outer space, including the Moon and celestial bodies*, art. II).

Este acuerdo constituye el eje sobre el que se ha venido apoyando el derecho espacial en los últimos años. Sus principales definiciones consagran un doble principio: libertad de exploración y uso del espacio exterior, y empleo en provecho común, sin posibilidad de apropiación por ningún estado. En definitiva, se define el espacio exterior como un patrimonio común de la Humanidad, no sujeto a intereses nacionales.

En el congreso UNISPACE'82, celebrado en Viena, se expresó el deseo de algunos países en desarrollo por controlar la distribución de las imágenes obtenidas sobre su territorio. Además, se convino en facilitar el acceso inmediato y no restrictivo a la información detectada sobre el territorio perteneciente a cada estado, así como en solicitar la previa autorización de éste para diseminar dicha información a terceros países (OTA, 1984).

En el momento presente, las posturas son muy variadas. Algunos países de Iberoamérica, como Brasil y Argentina, abogan porque el estado propietario de la plataforma pida permiso al estado detectado para tomar la información, y porque, en ningún caso, ésta se suministre a terceros países. La Unión Soviética y Francia no están de acuerdo con el previo permiso, pero sí con proporcionar la información al estado detectado y no a terceros países. En el mismo sentido, la Unión Soviética y la India, proponen que se limite a 50 m la resolución mínima de los sensores espaciales, con objeto de mantener las normas de seguridad militar. Estados Unidos, Reino Unido y Japón, se muestran partidarios de que no existan limitaciones en la observación y distribución de los datos.

Para reconciliar estas posturas, la Comisión de Naciones Unidas para el Uso Pacífico del Espacio Exterior creó un grupo de trabajo que estudiara los problemas derivados de la teledetección espacial. Tras numerosas discusiones, este Grupo presentó en 1986 un proyecto de

principios, que fue finalmente aprobado por la Asamblea General de l ONU en diciembre de 1986. Las grandes directrices de esta legislació pueden resumirse en los siguientes puntos (Tapia, 1989):

(i) la teledetección se realizará en provecho e interés de todos lo países, de acuerdo con el derecho internacional;

(ii) se respetará el principio de soberanía plena y permanente de lo Estados sobre su propia riqueza y recursos naturales, sin perjudicar lo legítimos derechos e intereses del Estado observado;

(iii) se promoverá la cooperación internacional sobre recepción interpretación y archivo de datos, prestándose asistencia técnica;

(iv) deberán los Estados informar al Secretario General de la Naciones Unidas de los programas de teledetección que se propongar desarrollar, así como a los Estados interesados que lo soliciten;

(v) se informará a los Estados afectados para prevenir fenómeno perjudiciales para su medio ambiente, y contarán con acceso sir discriminación y a un coste razonable, de los datos obtenidos sobre su territorio.

Estas líneas parecen marcar la evolución reciente del derecho espacia en lo que afecta a actividades de teledetección. La amplitud de esta actividades a otros países más allá de Estados Unidos y la Unión Soviética (caso de Japón, Canadá, India o Brasil), tiende a liberalizar aún más las disposiciones adquiridas, si bien no resultan todavía muy eficiente los mecanismos de transferencia tecnológica hacia terceros países, casi siempre los más necesitados de una información tan valiosa sobre sus propios recursos naturales.

1.5. PRINCIPALES APLICACIONES

No es el objeto de esta obra presentar las aplicaciones de la teledetección, sino únicamente introducir los fundamentos de trabajo que puedan ser utilizados por cualquier científico con preocupación por el territorio que le rodea.

No obstante, parece lógico dedicar un epígrafe a apuntar las aportaciones de esta técnica a diversas ciencias del medio ambiente. Esto puede darnos una idea de sus posibilidades de cara a un mejor conocimiento del espacio que nos circunda. La siguiente relación se extrae de la bibliografía disponible; esto es, se trata de temas en los que la teledetección ya ha demostrado su aplicabilidad. En el citado informe de la OTA (1984), se destacaban las siguientes áreas de aplicación (fig. 1.4):

- Estudio de la erosión de playas y arenales.

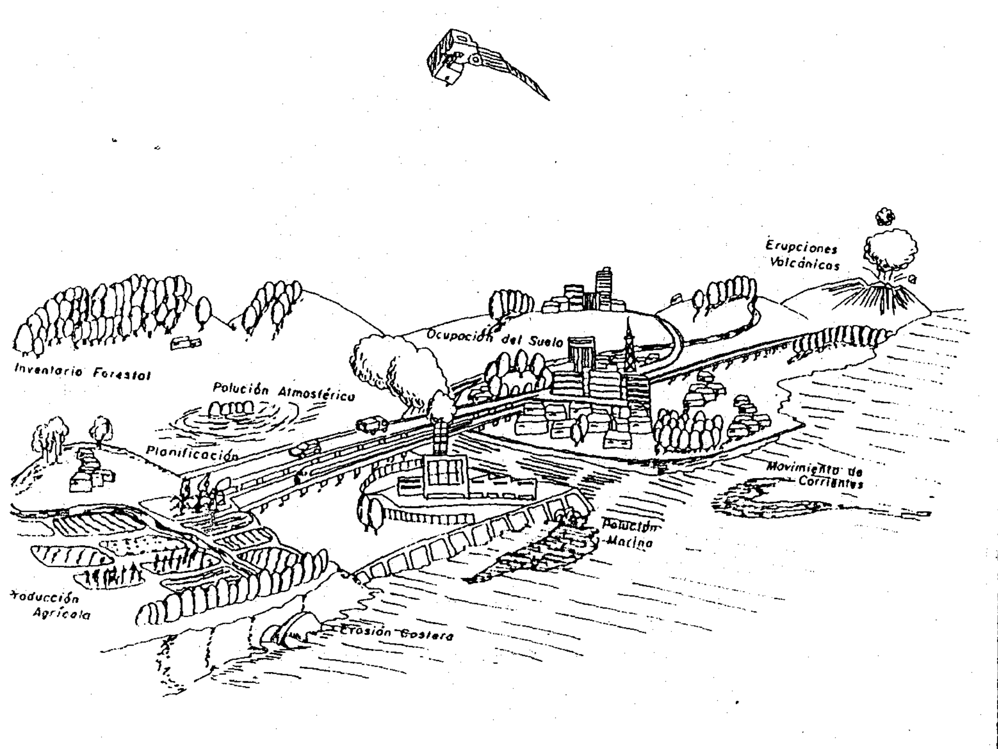


Fig. 1.4 - Aplicaciones de la teledetección espacial (Adaptado de NASDA, 1987)

- Inventario regional del medio ambiente para preparar estudios de impactos ambientales.
- Cartografía geológica para la exploración mineral y petrolífera.
- Cartografía de nuevos depósitos volcánicos.
- Control de la acumulación nival, de la fusión y de los cambios previsibles en la disponibilidad de energía hidroeléctrica.
- Control del movimiento de icebergs en zonas polares.
- Estimación de modelos de escorrentía y erosión.
- Inventario del agua superficial.
- Análisis en tiempo real de masas nubosas de escala media y pequeña.
- Medidas de aguas superficiales y humedales para evaluar la situación del hábitat para aves acuáticas.
- Verificación de contenidos de salinidad en las principales corrientes de agua.
- Cartografía térmica de la superficie del mar.

- Verificación y control de la calidad física del agua, turbidez y contenido de algas.
- Control de los movimientos del *Gulf-Stream* y otras corrientes marinas.
- Cartografía de la cobertura vegetal del suelo.
- Rápida evaluación de condiciones de estrés en la vegetación, por efectos de la sequía o deforestación.
- Cartografía de áreas quemadas y seguimiento de los ritmos de repoblación natural.
- Contribución a la cartografía e inventario de la cobertura y uso del suelo.
- Realización de inventarios forestales.
- Selección de rutas óptimas para nuevas vías de comunicación.
- Control de pastizales efímeros para estudiar efectos de la sequía y excesivo pastoreo.
- Cartografía e inventario de cultivos por especies.
- Predicción del rendimiento de cultivos.

Esta relación puede ampliarse y enriquecerse con la consulta a los principales manuales que dedican un amplio espacio a las aplicaciones de esta técnica. Entre otros, Campbell (1987), Colwell (Ed.) (1983, pp. 1233-2417), Harris (1987, pp. 107-185), Hall y Martinec (1985), Lillesand y Kiefer (1987), Lo (1986, pp. 40-368), Mulders (1987), Szekielda (1988, pp. 148-303).

1.6. LAS VENTAJAS DE LA OBSERVACIÓN ESPACIAL

Esta larga relación de temas de estudio, parece conducirnos a subrayar el interés de esta técnica para un amplio abanico de disciplinas. La mayor parte de las aplicaciones arriba reseñadas no son exclusivas de la teledetección espacial, sino que comparten su empleo con la fotografía aérea y los trabajos de campo. No obstante, el uso de la teledetección espacial facilita, en esos casos, un apoyo muy conveniente para reducir los costes o el tiempo invertido en obtener resultados. Ambos elementos, costes y tiempo, se justifican por las propias características de la observación espacial. En breves términos, esta técnica aporta -frente a la fotografía aérea- las siguientes ventajas:

(i) Cobertura global y periódica de la superficie terrestre. Gracias a las características orbitales del satélite podemos obtener imágenes repetitivas de la mayor parte de la Tierra, incluso de áreas inaccesibles por otros medios (zonas polares o desérticas, por ejemplo).

(ii) Visión panorámica. La altura orbital del satélite le permite

detectar grandes espacios, proporcionando una visión amplia de los hechos geográficos. Una fotografía aérea, escala 1:18.000 capta en una sola imagen un superficie aproximada de 16 km², que asciende a unos 49 km² en el caso de fotografías de mayor altitud (1:30.000). Una imagen Landsat nos permite contemplar 34.000 km² en una sola adquisición, cifrándose en 9 millones de km² los abarcados por una imagen del satélite meteorológico NOAA.

(iii) Homogeneidad en la toma de datos. Tan vasta superficie se detecta por el mismo sensor, y en una fracción muy pequeña de tiempo, lo que asegura la necesaria coherencia para abordar un estudio sobre grandes espacios.

(iv) Información sobre regiones no visibles del espectro. Los sensores ópticos-electrónicos facilitan imágenes sobre áreas no accesibles con la fotografía convencional: infrarrojo medio y térmico, micro-ondas. Estas bandas del espectro proporcionan una valiosa información para estudios medio ambientales, registrando problemas imperceptibles al ojo humano.

(v) Por último, el formato digital de las imágenes agiliza su tratamiento -con la ayuda de los equipos adecuados-, y reduce costes para integrar posteriormente los resultados con otro tipo de cartografía más convencional.

Esta relación no implica, naturalmente, que consideremos a la teledetección espacial como una panacea para detectar cualquier problema que afecte al medio ambiente. Esta observación es complementaria con otras técnicas convencionales, como la fotografía aérea, y no invalida la importancia del trabajo de campo. En otras palabras, es una técnica auxiliar más, idónea en múltiples contextos y discreta en otros, en los que su aplicación resulta sólo un ensayo experimental.

1.7. FUENTES BIBLIOGRÁFICAS

Como antes se indicó la teledetección es una técnica bastante reciente, pese a lo cual la producción bibliográfica resulta ya considerable. En el panorama internacional, se cuenta con numerosos congresos, revistas especializadas, manuales e informes de investigación centrados en esta tecnología. Esto explica la existencia de diversos catálogos bibliográficos (Carter, 1986; Hyatt, 1988), y de varias series periódicas dedicadas a la recopilación de literatura científica en este campo. Los más importantes, a este respecto, son: *Earth Resources: A Continuing Bibliography with Indexes*, publicada por NASA desde 1962, y *Geographical Abstracts, G: Remote Sensing, Photogrammetry and Cartography*, publicada por Geo Abstracts. En la misma línea, se sitúa la creación de bases bibliográficas

especializadas en teledetección, caso de la canadiense RESORS (*Remote Sensing Online Retrieval System*), o la inglesa GEOBASE.

Los Congresos más destacados son los que organizan las sociedades profesionales: *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS), *Remote Sensing Society* (RSS), y *European Association of Remote Sensing Laboratories* (EaRSEL). Todos ellos cuentan con una periodicidad anual. Cuentan también con gran prestigio la serie de congresos denominados *International Symposium on Remote Sensing of Environment*, organizados por el ERIM, los denominados *Machine Processing of Remotely Sensed Data*, que coordina el LARS, y los *Pecora Symposium*, centrados en aplicaciones medio ambientales.

En el capítulo de revistas especializadas, las más destacadas son: *Canadian Journal of Remote Sensing, Geocarto International, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, International Journal of Remote Sensing, ITC Journal, Photogrammetria, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Remote Sensing of Environment, Remote Sensing Quartely, Remote Sensing Reviews, Soviet Journal of Remote Sensing*.

Existen algunas obras publicadas con un amplio catálogo de imágenes adquiridas por distintos sensores espaciales. Las más interesantes y cuidadas son las denominadas *Earth Watch* (Sheffield, 1981) y *Man on Earth* (Sheffield, 1983), ambas de gran calidad, basadas exclusivamente sobre imágenes Landsat. Otras obras, de calidad y planteamiento similar son *Images of Earth* (Francis y Jones, 1984), que incluye algunas fotografías tomadas desde el transbordador espacial norteamericano, y *Mission to Earth: Landsat views of the World* (NASA, 1976). Con un criterio más cartográfico, destaca la obra de la casa alemana Westerman, traducida posteriormente al inglés (Smith, 1984), así como los atlas nacionales del Reino Unido (Bullard y Dixon, 1985) y de algunas regiones españolas (Sancho y Chuvieco, 1986). De similar contenido, es el ensayo cartográfico realizado por varios autores del Este europeo, con la novedad de incorporar fotografías adquiridas por plataformas soviéticas, poco accesibles en los países occidentales (Sagdejew et al, 1982).

Por último, un buen termómetro del grado de desarrollo que ha alcanzado esta disciplina refiere a la gran cantidad de manuales universitarios disponibles, una buena parte de ellos de muy reciente publicación. Entre las múltiples referencias de este tipo, merecen destacarse las obras de Barret y Curtis (1982), Campbell (1987), Colwell (Ed, 1983),

Curran (1985), Hall y Martinec (1985), Harris (1987), Harper (1983), Holz (1985), Jensen (1986), Lillesand y Kiefer (1987), Lo (1986), Mather (1987), Mulders (1987), Richards (1986), Sabins (1986), Schowengerdt (1983), Short (1982), Swain y Davis (1978), Szekielda (1988) y Townshend (1981)

2. PRINCIPIOS FÍSICOS DE LA TELEDETECCIÓN

En el capítulo anterior se presentaban algunos aspectos introductorios de las técnicas analizadas en esta obra. En los dos próximos, se van a exponer los procesos que permiten la adquisición de la imagen, para dedicar el resto a las tareas de interpretación. Como científicos con preocupación por el medio ambiente, lo habitual será que estos últimos sean los que merezcan una mayor atención. Sin embargo, como es obvio, la interpretación de la imagen será tanto más rigurosa, cuanto mayor conocimiento se tenga de los procesos que permitieron adquirirla.

2.1. FUNDAMENTOS DE LA OBSERVACIÓN REMOTA

Anteriormente se definió la teledetección como aquella técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre. Para que esta observación remota sea posible, es preciso que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción. Nuestros sentidos perciben un objeto sólo cuando pueden descifrar la información que éste les envía. Por ejemplo, somos capaces de ver un árbol porque nuestros ojos reciben y traducen convenientemente una energía luminosa procedente del mismo. Esa señal, además, no es originada por el árbol, sino por un foco energético exterior que le ilumina. De ahí que no seamos capaces de percibir ese árbol en plena oscuridad.

Este sencillo ejemplo nos sirve para introducir los tres principales elementos de cualquier sistema de teledetección: sensor (nuestro ojo), objeto observado (árbol) y flujo energético que permite poner a ambos en relación. En el caso del ojo, ese flujo procede del objeto por reflexión de la luz solar. Podría también tratarse de un tipo de energía emitida por el propio objeto, o incluso por el sensor. Estas son, precisamente, las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión (fig. 2.1).

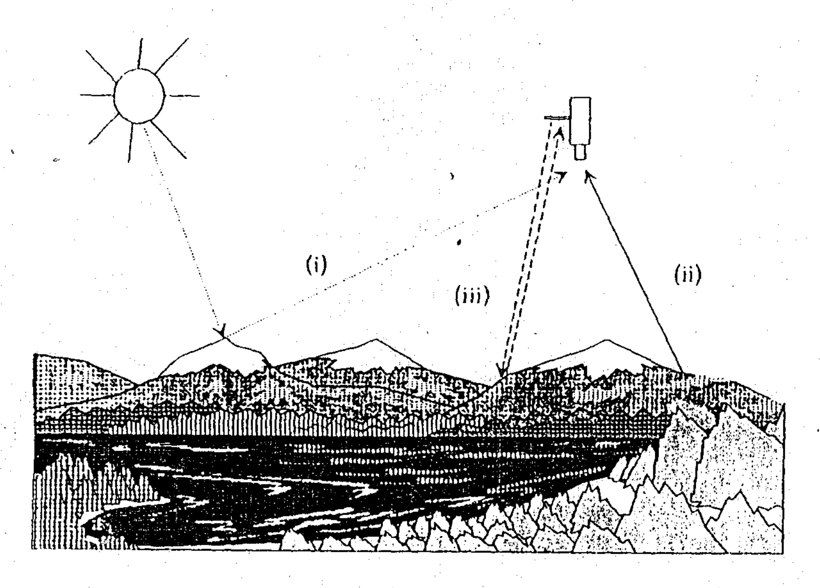


Fig. 2.1 - Formas de teledetección

La primera de ellas es la forma más importante de teledetección, pues se deriva directamente de la luz solar, principal fuente de energía de nuestro Planeta. El sol ilumina la superficie terrestre, que refleja esa energía en función del tipo de cubierta presente sobre ella. Ese flujo reflejado se recoge por el sensor, que lo transmite posteriormente a las estaciones receptoras. Entre superficie y sensor se interpone la atmósfera, que dispersa y absorbe parte de la señal original. De igual forma, la observación remota puede basarse en la energía emitida por las propias cubiertas, o en la que podríamos enviar desde un sensor que fuera capaz, tanto de generar su propio flujo energético, como de recoger posteriormente su reflexión sobre la superficie terrestre.

En cualquiera de estos casos, el flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electro-magnética. Como es sabido, la energía térmica se transfiere de un lugar a otro por tres procesos: convección, conducción, y radiación. De ellos, nos centraremos en este último, pues constituye la base de los sistemas de teledetección analizados en esta obra.

Históricamente las propiedades de la radiación electro-magnética se han explicado por dos teorías aparentemente contrapuestas: aquella que

la concibe como un haz ondulatorio (Huygens, Maxwell), y aquella otra que la considera como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos, con masa igual a cero (Planck, Einstein). Actualmente, parece que ambas teorías se pueden compaginar, pues se ha demostrado que la luz puede comportarse de acuerdo a ambos planteamientos.

Según la teoría ondulatoria, la energía electro-magnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético (fig. 2.2). Las características de este flujo energético pueden describirse por dos elementos: longitud de onda (λ) y frecuencia (F). La primera hace referencia a la distancia entre dos picos sucesivos de una onda mientras que la frecuencia designa el número de ciclos pasando por un punto fijo en una unidad de tiempo. Ambos elementos están inversamente relacionados, como describe la siguiente fórmula:

$$c = \lambda F \qquad [2.1]$$

donde c indica la velocidad de la luz (3×10^8 m/s), λ expresa la longitud de onda y F la frecuencia (Herzios, ciclos por segundo). En definitiva, a mayor longitud de onda, menor frecuencia y viceversa, por lo que basta con indicar un sólo término para identificar propiamente el tipo de energía mencionado.

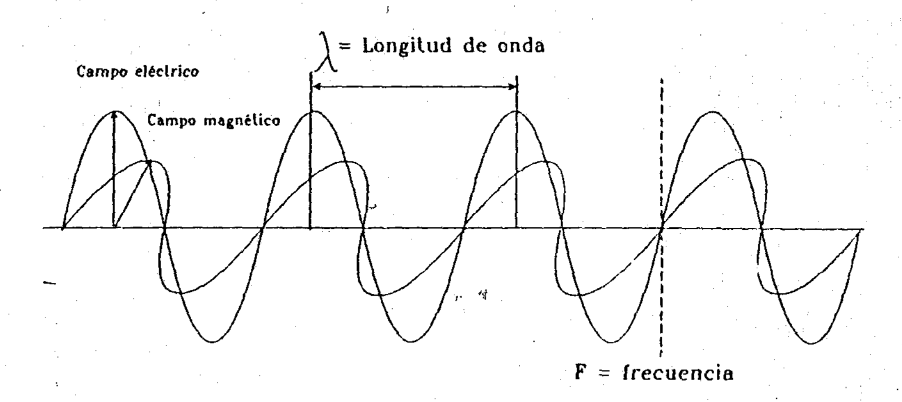


Fig. 2.2 - Esquema de una onda electro-magnética

Gracias a la teoría cuántica, podemos calcular la cantidad de energía transportada por un fotón, siempre que se conozca su frecuencia:

$$Q = h\ F \qquad [2.2]$$

donde Q es la energía radiante de un fotón (en julios), F la frecuencia y h la constante de Planck ($6,6 \times 10^{-34}$ J s). Sustituyendo en [2.1] podemos así mismo expresar:

$$Q = h\ (c/\lambda) \qquad [2.3]$$

lo que significa, en definitiva, que a mayor longitud de onda - o menor frecuencia- el contenido energético será menor y viceversa. Esto implica que la radiación en longitudes de onda largas es más difícil de detectar que aquella centrada en longitudes cortas, de ahí que las primeras requieran más sofisticados medios de detección.

2.2. EL ESPECTRO ELECTRO-MAGNÉTICO

De las fórmulas anteriores, se deduce que podemos describir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia. Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electro-magnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitudes de onda o frecuencia se denomina espectro electro-magnético (fig. 2.3). Comprende, en un continuo, desde las longitudes de onda más cortas (rayos gamma, rayos X), hasta las kilométricas (tele-comunicaciones). Las unidades de medida más comunes se relacionan con la longitud de onda. Para las más cortas se utilizan micras ($\mu m = 10^{-6}$ metros), mientras las más largas se miden en centímetros o metros. Normalmente a éstas últimas (denominadas micro-ondas) se les designa también por valores de frecuencia (en gigahercios, GHz = 10^8 Hz).

Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentemente empleadas con la tecnología actual. Su denominación y amplitud varían según distintos autores, si bien la terminología más común es la siguiente:

- Espectro visible (0,4 a 0,7 μm). Se denomina así por tratarse de la única radiación electro-magnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul (0,4 a 0,5 μm); verde (0,5 a 0,6 μm), y rojo (0,6 a 0,7 μm), en razón de los colores elementales asociados a esas longitudes de onda.

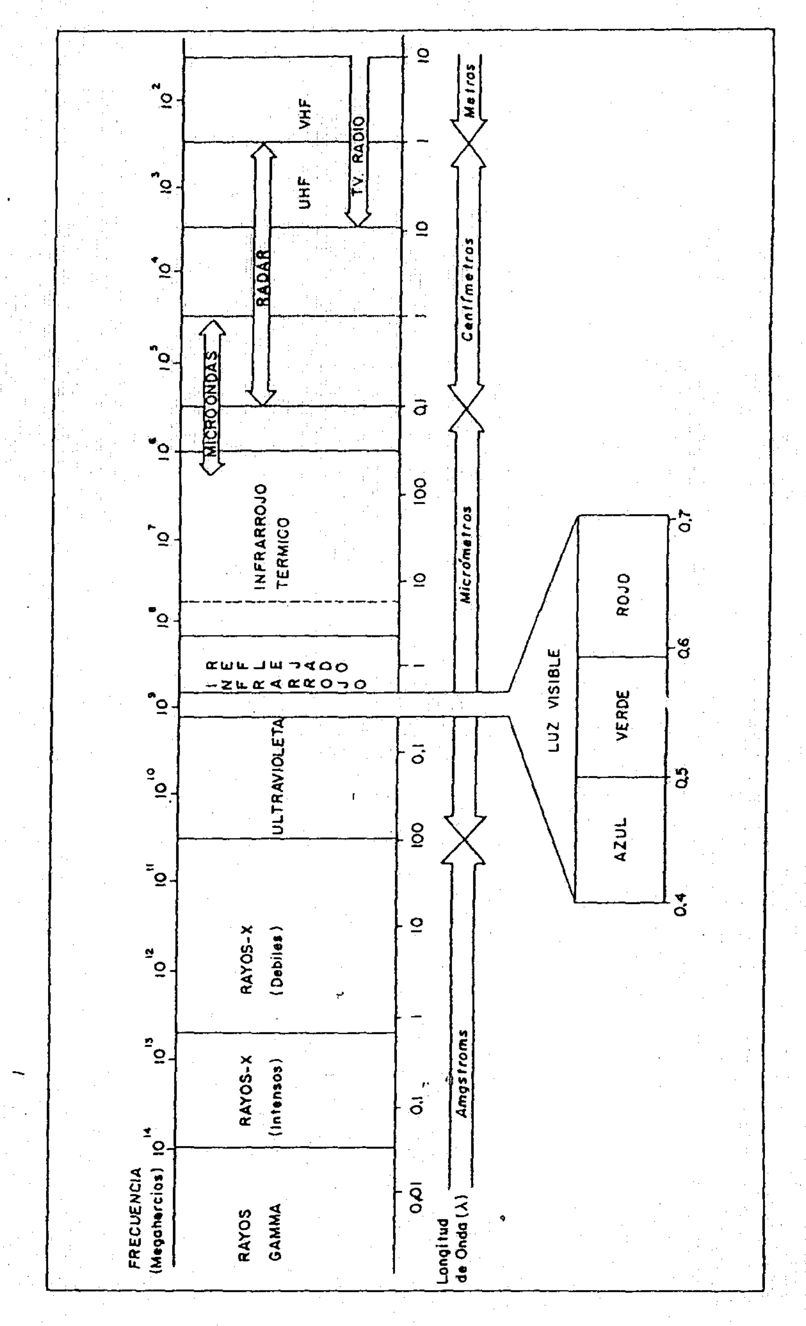


Fig. 2.3 - Espectro electro-magnético

- Infrarrojo próximo (0,7 a 1,3 μm). A veces se denomina también infrarrojo reflejado y fotográfico, puesto que puede detectarse a partir de films dotados de emulsiones especiales. Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio (1,3 a 8 μm), en donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.
- Infrarrojo lejano o térmico (8 a 14 μm), que incluye la porción emisiva del espectro terrestre.
- Micro-ondas (a partir de 1 mm), con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

Más adelante se estudiará el comportamiento espectral de las principales cubiertas terrestres en cada una de estas bandas del espectro. Antes de ello, convendrá introducir algunos conceptos y unidades de medida comúnmente empleadas en teledetección.

2.3. TÉRMINOS Y UNIDADES DE MEDIDA

Como más arriba se indicó, para que pueda producirse una observación remota de la superficie terrestre es preciso que el sensor detecte un flujo energético proveniente de ésta. Ese flujo tiene una intensidad determinada, proveniente de o dirigida a una unidad de superficie y con una dirección concreta. Convendrá, por tanto, explicitar las unidades de medida comúnmente empleadas en teledetección, con objeto de ser más rigurosos a la hora de abordar posteriormente los procesos de adquisición. La formulación precisa de cada una de estas magnitudes se acompaña en la tabla 2.1 (Slater, 1980; Curran, 1985; Elachi, 1987):

- Energía radiante (Q). Indica el total de energía radiada en todas las direcciones. Se mide en julios (J).
- Densidad radiante (W). Total de energía radiada en todas las direcciones por unidad de volumen. Se mide en julios por metro cúbico (J / m^3).
- Flujo radiante (ϕ). Total de energía radiada en todas las direcciones por unidad de tiempo. Se mide en vatios (W).
- Emitancia o excitancia radiante (M). Total de energía radiada en todas las direcciones desde una unidad de área y por unidad de tiempo. Se mide en vatios por metro cuadrado (W / m^2).
- Irradiancia radiante (E), total de energía radiada sobre una unidad de área y por unidad de tiempo. Es equivalente a la emitancia, si bien ésta indica la energía emitida, mientras la irradiancia refiere a la incidente (W / m^2).
- Intensidad radiante (I). Total de energía radiada por unidad de tiempo y por ángulo sólido (Ω). Se trata éste de un ángulo tridimensional, que refiere a la sección completa de la energía transmitida, y se mide en estereo-radianes (fig. 2.4). Por tanto la intensidad radiante se mide en vatios por estereo-radian (W / sr).
- Radiancia (L). Total de energía radiada por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Es un término fundamental en teledetección,

Tabla 2.1.
Magnitudes radiométricas comúnmente utilizadas en Teledetección

Concepto	Símbolo	Fórmula	Unidad de Medida
Energía radiante	Q	--	julios (J)
Densidad radiante	W	$\delta Q/\delta v$	J / m^3
Flujo radiante	ϕ	$\delta Q/\delta t$	vatios (W)
Emitancia radiante	M	$\delta\phi/\delta A$	W / m^2
Irradiancia	E	$\delta\phi/\delta A$	W / m^2
Intensidad radiante	I	$\delta\phi/\delta\Omega$	W / sr
Radiancia	L	$\frac{\delta I \cos\theta}{\delta A}$	$W / m^2\ sr$
Radiancia espectral	L_λ	$\delta L/\delta\lambda$	$W / m^2\ sr\ \mu m$
Emisividad	ϵ	M/M_n	
Reflectividad	ρ	ϕ_r/ϕ_i	
Absortividad	α	ϕ_a/ϕ_i	
Transmisividad	τ	ϕ_t/ϕ_i	

sr, estereo-radian, medida del ángulo sólido
μm, micrómetro o micra (10^{-6} metros)
M_n, Emitancia de un cuerpo negro
ϕ_i, flujo incidente
ϕ_r, flujo reflejado
ϕ_a, flujo absorbido
ϕ_t, flujo transmitido
θ, ángulo formado por la superficie y la dirección normal

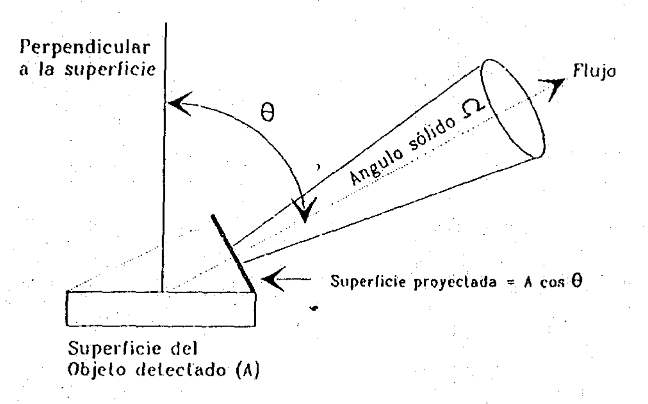


Fig. 2.4 - Diagrama de un ángulo sólido

por que, de hecho, describe lo que mide el sensor. Se cuantifica en vatios por metro cuadrado y estereo-radian (W / m² sr).

- Radiancia espectral (L_λ). Por extensión del concepto anterior, indica el total de energía radiada en una determinada longitud de onda por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Por cuanto el sensor detecta una banda particular del espectro, ésta es la medida más cercana a la observación remota. De igual forma que la radiancia, la emitancia e irradiancia también puede completarse con el calificativo de espectral (añadiendo el subíndice λ), para referir a una determinada longitud de onda.
- Emisividad (ϵ), relación entre la emitancia de una superficie (M), y la que ofrecería un emisor perfecto, denominado cuerpo negro, a la misma temperatura (M_n).
- Reflectividad (ρ), relación entre el flujo incidente y el reflejado por una superficie;
- Absortividad (α), relación entre el flujo incidente y el que absorbe una superficie;
- Transmisividad (τ), relación entre el flujo incidente y el transmitido por una superficie.

Estos últimos términos son adimensionales; suelen expresarse en tantos por ciento o por uno. Por esta razón, hemos traducido los términos ingleses: *emittance, reflectance, absorptance y transmittance*, añadiendo el sufijo "ividad", para indicar que son cantidades relativas, distinguiéndolas así de las anteriores. También estas magnitudes son dependientes de la longitud de onda, por lo que conviene completarlas con el calificativo de espectral, para referirse a su comportamiento en una banda determinada del espectro.

2.4. PRINCIPIOS Y LEYES DE LA RADIACIÓN ELECTRO-MAGNÉTICA

El objeto de este capítulo es caracterizar espectralmente las distintas cubiertas de interés medio ambiental. Para ello, resulta obligado comentar los procesos más importantes que permiten explicar ese comportamiento, así como los factores que intervienen en su variación. Esta base permitirá abordar una interpretación más rigurosa de la imagen finalmente obtenida por el sensor.

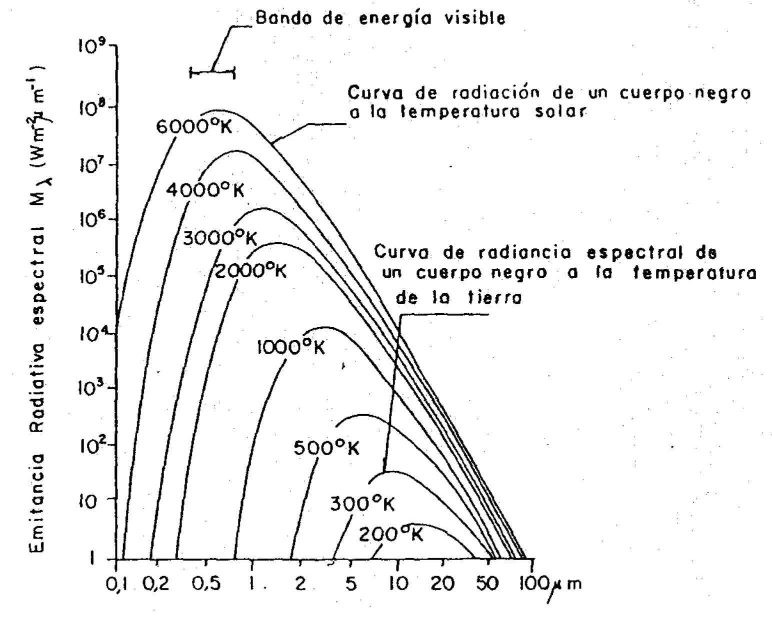


Fig. 2.5 - Curva de emitancia radiativa de un cuerpo negro a distintas temperaturas

De acuerdo a la fórmula [2.3], la cantidad de energía que contiene un flujo radiante es inversamente proporcional a su longitud de onda. Esta

relación entre flujo de energía y longitud de onda, puede establecerse con mayor rigor gracias a la ley de Planck:

$$M_{n,\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \{\exp(hc/\lambda kT) - 1\}} \quad [2.4]$$

donde $M_{n,\lambda}$ indica la emitancia radiativa espectral de un cuerpo negro a una determinada longitud de onda (λ); h es la constante de Planck (6,626 x 10^{-34} W s²); k, la constante de Boltzman (1,38 x 10^{-23} W s² / K); c, la velocidad de la luz; λ, la longitud de onda, y T, la temperatura absoluta de un cuerpo negro (en Kelvin, K). Esta fórmula se puede simplificar sustituyendo algunos términos por constantes:

$$M_{n,\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 (\exp(c_2/\lambda T) - 1)} \quad [2.5]$$

donde c_1 puede sustituirse por 3,74 x 10^{-16} W m², y c_2 por 1,44 x 10^{-2} m K.

En pocas palabras, la fórmula de Planck nos señala que cualquier objeto por encima del cero absoluto (-273 °C) radia energía, y que ésta incrementa con la temperatura. A la vez, a mayor temperatura, ese cuerpo radiará con más intensidad en longitudes de onda más cortas. De esta fórmula podemos reconstruir la curva de emitancia de un cuerpo negro a distintas temperaturas (fig. 2.5). El gráfico es muy interesante para conocer el comportamiento espectral de un objeto, siempre que conozcamos su temperatura y su emisividad; esto es, su grado de similitud con un cuerpo negro.

A partir de la fórmula de Planck puede calcularse la longitud de onda a la que se produce la máxima emitancia de un cuerpo negro conociendo su temperatura (T) en Kelvin. Esta es la llamada ley del desplazamiento de Wien:

$$\lambda_{max} = 2898\ \mu m\ K / T \quad [2.6]$$

que tiene una gran importancia para seleccionar la banda más conveniente para detectar un determinado fenómeno, siempre que se conozca su temperatura. Por ejemplo, en el caso de los incendios forestales, teniendo en cuenta que la temperatura de combustión se sitúa entre 275 y 420°C, la ley de Wien nos permite situar entre 5,28 y 4,30 μm

(infrarrojo medio) la banda espectral más adecuada para su detección. Por su parte, el sol -con una temperatura radiante próxima a los 5700 °C presenta su máxima emitancia en la región del espectro visible (0,4 a 0,7 μm). En definitiva, cuanto más caliente esté el objeto emisor radiará a longitudes de onda más cortas.

Acumulando la emitancia espectral de un cuerpo negro para todas las longitudes de onda, podemos calcular el total de energía que radia por unidad de superficie, gracias a la ley de Stefan-Boltzmann:

$$M_n = \sigma T^4 \quad [2.7]$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann (5,67 x 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}), y T la temperatura en Kelvin. Gracias a esta fórmula, resulta evidente que la emitancia global de un objeto es una función de su temperatura, y que pequeños cambios en ésta suponen notables modificaciones en la emitancia radiante. Por otra parte, conociendo la temperatura de un objeto emisor, podemos también estimar la irradiancia incidente sobre el sensor, por cuanto emitancia e irradiancia son funcionalmente equivalentes.

Hasta aquí, hemos supuesto que las superficies naturales se comportan como cuerpos negros, lo cual es una exagerada simplificación. Por ello, se han de corregir las fórmulas anteriores añadiendo un nuevo parámetro, la emisividad, de acuerdo a la Ley de Kirchoff:

$$M = \epsilon M_n \quad [2.8]$$

La emisividad ya se definió como el grado de similitud entre la emitancia radiante de un objeto y la que presentaría un cuerpo negro a la misma temperatura. Con este nombre se indica un emisor perfecto; esto es, un objeto que absorbe y emite toda la energía que recibe. También se habla de cuerpos blancos o reflectores perfectos, cuando no absorben nada de la energía incidente, sino que la reflejan por completo (emisividad = 0). Asímismo, se denominan cuerpos grises a aquellos objetos que absorben y emiten de forma constante en distintas longitudes de onda (emisividad constante). Cuando la emisividad varía con la longitud de onda, se habla de radiadores selectivos. Son los más frecuentes en la naturaleza. Gracias a ese comportamiento particular, pueden discriminarse de otro tipo de superficies en el infrarrojo térmico.

A partir de las fórmulas [2.4 a 2.8] podemos estimar la emitancia total y espectral de un objeto conociendo su temperatura absoluta, siendo

aquella tanto mayor cuanto más alta sea ésta. En definitiva, la energía emitida desde un objeto es primariamente una función de su temperatura. Pequeños cambios en ésta suponen una modificación sensible de la emitancia total, de acuerdo a [2.7]. Además, conociendo la temperatura de un objeto o cubierta de interés -y dado que pueda estimarse su emisividad-, puede determinarse la banda del espectro que resulte más idónea para su discriminación.

Con estas nociones puede abordarse el comentario más detallado de las tres bandas del espectro en donde se realizan procesos de teledetección: longitudes de onda cortas (desde el visible al infrarrojo medio), medias (térmico) y largas (micro-ondas).

2.5. EL DOMINIO ÓPTICO DEL ESPECTRO

2.5.1. Características de la radiación energética en el espectro óptico

Se denomina dominio óptico del espectro a aquel grupo de longitudes de onda directamente dependientes de la energía solar. También se han incluido en este epígrafe las correspondientes al infrarrojo medio, puesto que mantienen una importante relación con esta fuente de energía, si bien se encuentran a medio camino entre ésta y la derivada de la emisión de calor que realizan los objetos.

En cualquier caso, conviene analizar con más detenimiento en este apartado las características espectrales del sol, fuente primordial de energía radiante en nuestro planeta. Mas adelante nos detendremos en analizar el comportamiento de las principales coberturas terrestres frente a este tipo de radiación.

El sol se encuentra a una temperatura radiante próxima a los 6.000 K. Esto implica, según la ley de Wien, que su máxima emitancia espectral se produce en torno a las 0,48 μm, coincidente con el color verde apreciado por nuestros ojos. La curva espectral de la radiación solar se asemeja bastante a la de un cuerpo negro a esa temperatura, tal y como aparece en la figura 2.6. En este gráfico se observa cómo el sol presenta una banda de elevada emitancia entre 0,3 y 2 μm, reduciéndose en valores más altos y más bajos de este sector por efecto de la atmósfera. A esa banda se le denomina dominio óptico del espectro, y constituye la región de mayor interés para la observación remota de la superficie terrestre.

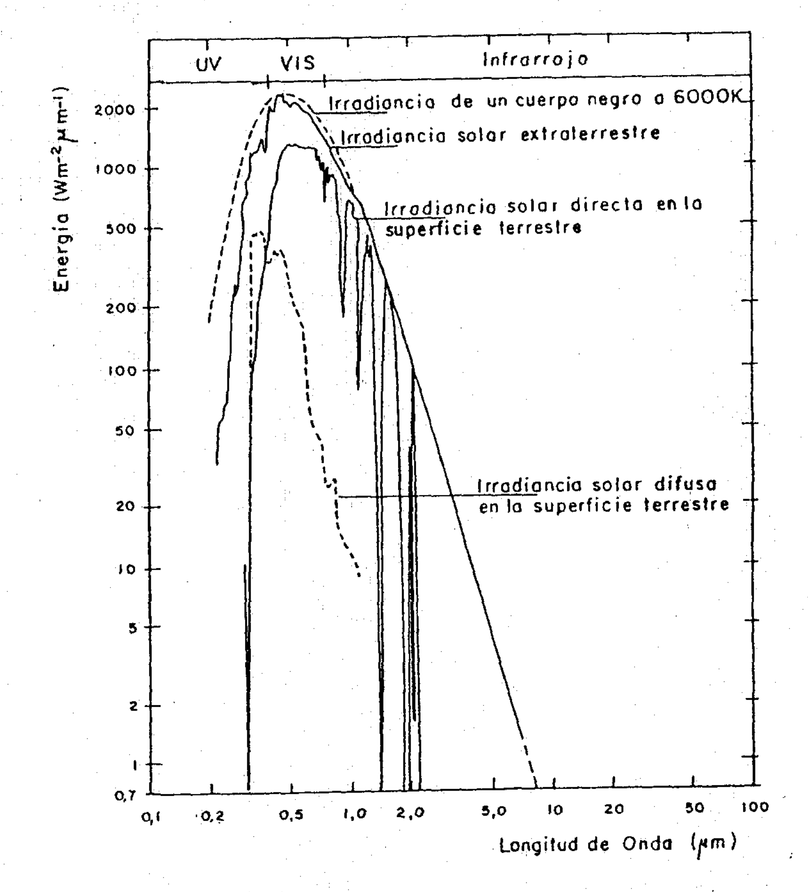


Fig. 2.6 - Curva de emitancia radiativa del Sol

Hasta aquí se ha considerado el origen de la radiación. Más importante aún para nuestro objetivo es entender cómo este flujo interacciona con la superficie terrestre. La radiación que ésta recibe puede descomponerse en tres términos (fig. 2.7):

$$\phi_i = \phi_r + \phi_a + \phi_t \qquad [2.9]$$

Esto es, el flujo incidente sobre una superficie es reflejado, transmitido o absorbido. Resulta conveniente expresar esta fórmula en unidades

relativas. Para ello, basta dividir cada término de la expresión anterior por ϕ_i:

$$\frac{\phi_i}{\phi_i} = \frac{\phi_r}{\phi_i} + \frac{\phi_a}{\phi_i} + \frac{\phi_t}{\phi_i} \qquad [2.10]$$

o, lo que es lo mismo:

$$1 = \rho + \alpha + \tau \qquad [2.11]$$

En definitiva, la suma de la reflectividad, absortividad y transmisividad ha de ser igual a uno. La relación entre las tres magnitudes no es constante con la longitud de onda, por tanto, en términos más rigurosos, debería expresarse como:

$$1 = \rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda \qquad [2.12]$$

La proporción del flujo incidente que es reflejado, absorbido y transmitido depende de las características de la superficie que se observa.

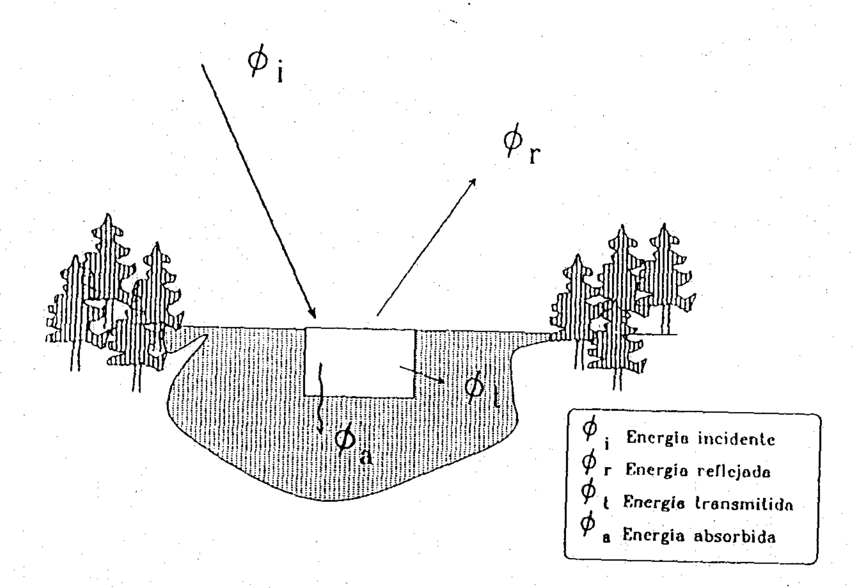


Fig. 2.7 - Relación entre flujo incidente y reflejado

Por cuanto esa proporción varía en distintas bandas del espectro, nos resulta muy interesante conocer el comportamiento de dicha cubierta en diversas longitudes de onda, de cara a realizar una más atinada discriminación, puesto que sólo cuando existan divergencias espectrales entre dos superficies podrán éstas separarse adecuadamente.

En el caso del espectro visible, ese comportamiento disimilar de los objetos a distintas longitudes de onda se manifiesta en lo que llamamos color: un objeto es azul si refleja intensamente la energía en esa banda del espectro y poco en el resto (dicho de otro modo, si absorbe o transmite poca energía incidente en esa banda), mientras será verde si su reflectividad se centra en esa banda y es baja en otras.

A partir de medidas de laboratorio, se han obtenido unas curvas de reflectividad espectral para las principales cubiertas terrestres (fig. 2.8). Como puede observarse, algunas tienden a presentar una respuesta uniforme en distintas longitudes de onda, mientras otras ofrecen un comportamiento mucho más selectivo. La nieve presenta una reflectividad alta y constante, pues refleja la mayor parte de la energía incidente a distintas longitudes de onda. Por el contrario, el agua absorbe

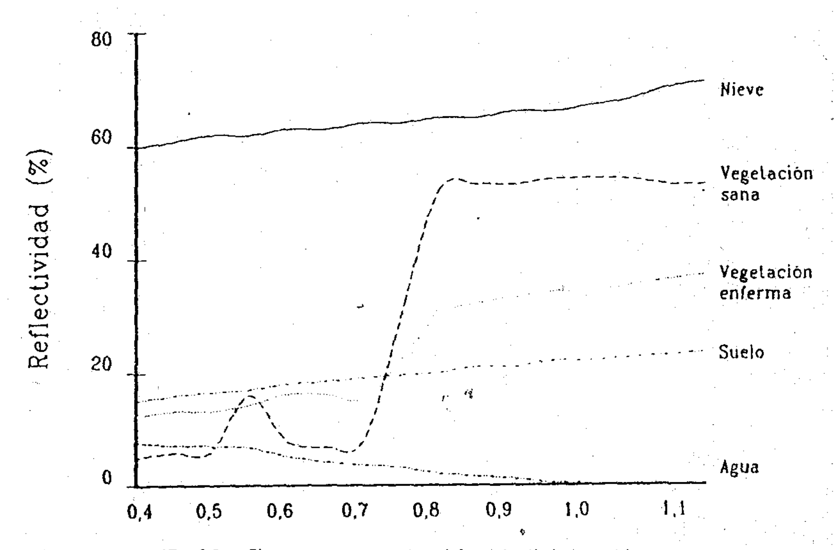


Fig. 2.8 - Signaturas espectrales típicas de distintas cubiertas

la mayor parte de la energía que recibe, tanto más según nos situamos en longitudes de onda mayores. Por su parte, la vegetación presenta un comportamiento muy cromático, con bajos valores de reflectividad en el espectro visible y más elevados en el infrarrojo cercano.

Más adelante se analizarán con detalle estos valores teóricos de reflectividad para el caso de la vegetación, agua y suelo. Antes de ello, es importante considerar que el flujo de energía recibido por el sensor no sólo depende de la reflectividad de la cubierta, sino también de otros factores externos. Los más importantes son: (i) las condiciones atmosféricas, (ii) el emplazamiento ambiental de la cubierta y (iii) la geometría de la observación.

Los dos primeros aspectos se tratarán más adelante. En cuanto a las condiciones de observación, conviene tener presente que la cantidad de energía que llega al sensor depende del ángulo con que la superficie refleje la energía incidente, así como del que formen el haz incidente con la posición del sensor. Esta geometría de observación está estrechamente ligada a la rugosidad que presenta la superficie. Así, pueden distinguirse dos tipos de cubiertas (fig. 2.9): aquellas que reflejan la energía con el mismo ángulo del flujo incidente (especulares), y aquellas que lo reflejan uniformemente en todas las direcciones (lambertianas). La mayor parte de las cubiertas tienden a comportarse de modo intermedio entre ambas situaciones, en función de sus características y de la longitud de onda en la que se trabaje. Si la longitud de onda es pequeña, las rugosidades

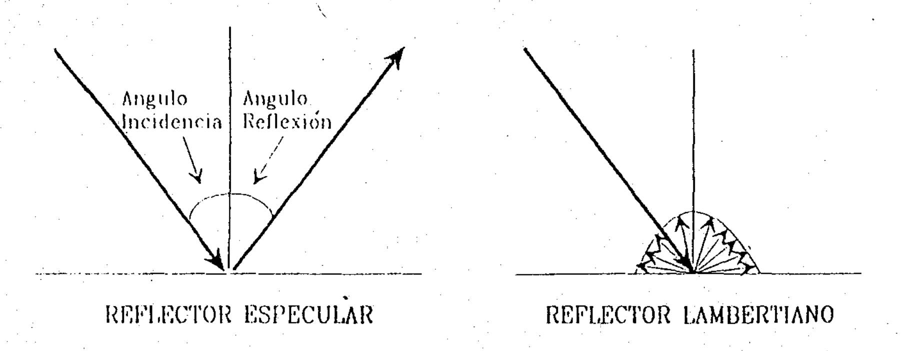


Fig. 2.9 - Superficies especulares y lambertianas

del terreno tenderán a difundir mucho más la energía incidente que si se trata de longitudes de onda mayores, en donde esas mismas partículas pueden no impedir un comportamiento especular. En el espectro visible, por ejemplo, sólo el agua en calma presenta un carácter casi especular, mientras el resto de las cubiertas tienden a ofrecen un comportamiento difusor. En longitudes de onda mayores (micro-ondas), también otras cubiertas puedan actuar de modo especular, siempre que la rugosidad del terreno sea suficientemente pequeña.

En cualquier caso, el ángulo de elevación solar y el ángulo de observación juegan un papel muy destacado en la respuesta finalmente obtenida por el sensor. En pocas palabras, el sensor puede registrar un valor distinto de radiancia espectral para un mismo tipo de cubierta -con la misma o similar reflectividad-, si varían las condiciones de observación o de iluminación. Si a este hecho añadimos que la reflectividad presenta variaciones estacionales, muy notables en el caso de las cubiertas vegetales, se subraya la complejidad que la observación remota lleva consigo. En suma, el comportamiento de una cubierta en el espectro visible está influido no sólo por sus propias características, sino también por una serie de factores externos que modifican lo que podríamos llamar su comportamiento espectral teórico. Algunos de estos factores son (fig. 2.10):

(i) Ángulo de iluminación solar, muy dependiente de la fecha del año y del momento de paso del satélite.

(ii) Modificaciones que el relieve introduce en el ángulo de iluminación (pendiente u orientación de las laderas).

(iii) Influencia de la atmósfera, especialmente en lo que se refiere a la dispersión selectiva en distintas longitudes de onda (2.8.2).

(iv) Variaciones medio ambientales en la cubierta: asociación con otras superficies, homogeneidad que presenta, estado fenológico, etc.

(v) Ángulo de observación, relacionado con la órbita del satélite y con las características del sensor.

Todos estos factores denuncian la complejidad que puede entrañar la caracterización de un tipo de cubierta a partir de sensores remotos. También nos sirven para matizar un tanto el concepto de signatura espectral, ampliamente utilizado en estudios de teledetección (Slater, 1980; Meliá et al, 1986). Este concepto hace referencia al modo peculiar con el que una determinada cubierta refleja o emite energía a distintas longitudes de onda. Su forma característica de radiar energía sería la base para discriminar dicha cubierta, frente a otras, a partir de la observación remota. Ahora bien, como venimos comentando, este concepto debe matizarse, ya que -además del comportamiento espectral propio de cada

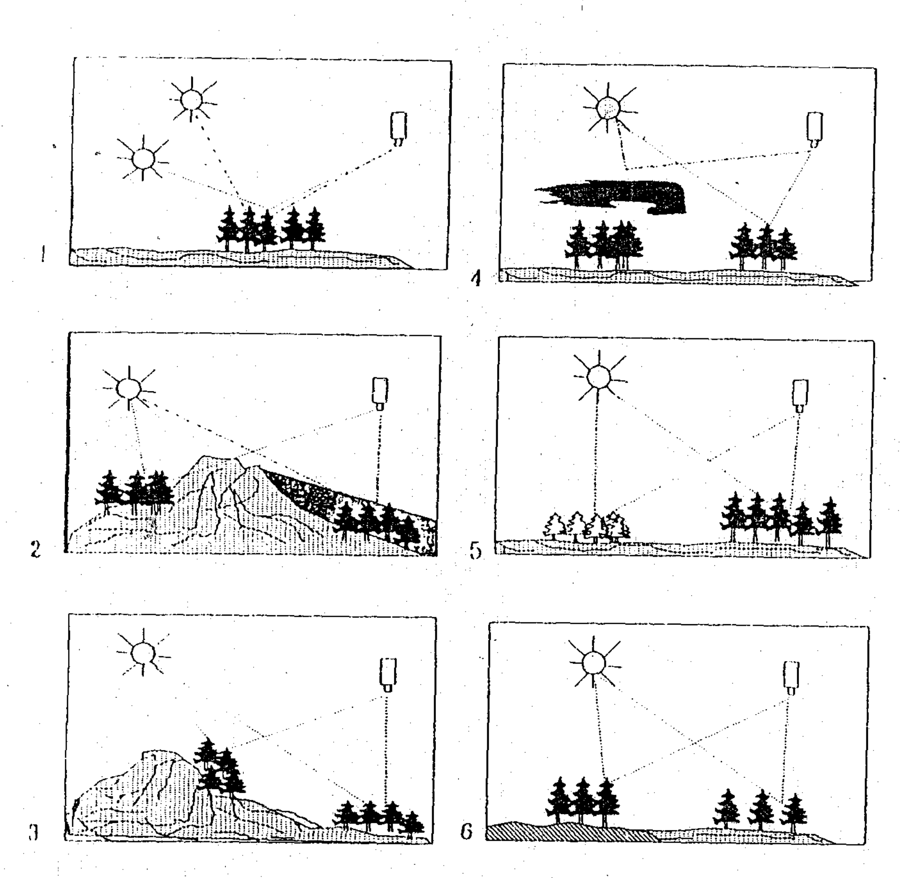


Fig. 2.10 - Factores que modifican la signatura espectral

cubierta- hay que considerar los factores arriba indicados, que modifican esa signatura característica. En suma, las distintas cubiertas de la superficie terrestre no tienen un comportamiento espectral único y permanente, que coincida con sus curvas de reflectividad espectral y permita reconocerlas sin confusión frente a otras superficies. Por el contrario, en torno a un comportamiento tipo, que denominamos signatura espectral, cada cubierta presenta una cierta variabilidad espectral, debida a los factores ya comentados, y que dificulta -en última instancia- su discriminación de otras superficies.

Pese a estos comentarios, no cabe duda que las curvas de reflectividad arriba analizadas son muy útiles para interpretar más fielmente la imagen, por cuanto relacionan los valores adquiridos por el sensor con las medidas de laboratorio. A la vez, estas gráficas nos permiten seleccionar las bandas más convenientes para la detección de las cubiertas terrestres bajo estudio.

A continuación, se analizan con mayor detalle los factores que explican este comportamiento espectral teórico para el caso de los tres elementos fundamentales del paisaje: vegetación, suelo y agua.

2.5.2. Características de la vegetación en el espectro óptico

La caracterización espectral de las masas vegetales es, sin duda, una de las tareas más interesantes en teledetección. Pese a su gran importancia, aún ofrece notables dificultades como consecuencia de los múltiples factores que influyen en la radiancia final detectada por el sensor. En primera instancia, ha de considerarse la propia reflectividad de la hoja, en función de su estado fenológico, forma y contenido de humedad. Además es preciso tener en cuenta las características morfológicas de la planta: su altura, perfil, grado de cobertura del suelo, etc., que provocan una notable modificación de su comportamiento reflectivo. Un tercer grupo de factores serían los derivados de la situación geográfica de la planta: pendiente, orientación, asociación con otras especies, geometría de plantación, etc.

A pesar de las variaciones que introducen estos factores, vamos aquí a detenernos en el comportamiento espectral de la vegetación vigorosa. Para ello, contamos con varios estudios teóricos (Gates et al, 1965; Knipling, 1970; Colwell, 1974; Curran, 1980; Jensen, 1983), y con una serie de curvas espectrales obtenidas en mediciones de laboratorio (fig. 2.11).

De acuerdo a estos trabajos, el comportamiento típico de la vegetación vigorosa muestra una reducida reflectividad en las bandas visibles, con un máximo relativo en la porción verde del espectro (en torno a 0,55 μm). Por el contrario, en el infrarrojo cercano presenta una elevada reflectividad, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo medio.

Estas características espectrales se relacionan, primordialmente, con la acción de los pigmentos foto-sintéticos y del agua que almacenan las hojas. En concreto, la baja reflectividad en la porción visible del

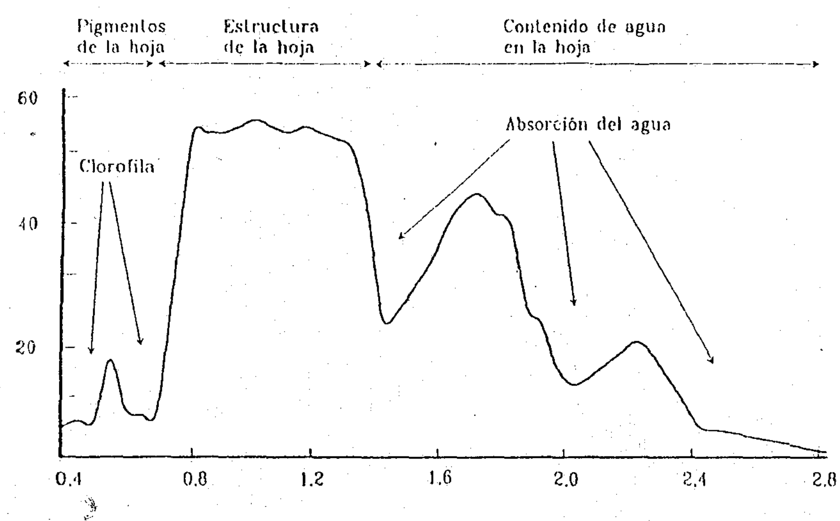


Fig. 2.11 - Signatura espectral de la vegetación sana

espectro se debe al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja, principalmente las clorofilas, xantofilas y carotenos (65, 29 y 6 %, respectivamente, aunque la proporción puede variar mucho: Gates et al, 1965). Todos ellos absorben en la banda del espectro situada en torno a los 0,445 μm, mientras la clorofila presenta una segunda banda de absorción en torno a los 0,645 μm. Entre ambas porciones del espectro, aparece una banda intermedia, alrededor de los 0,55 μm, en donde el efecto absorbente es menor. Por esta causa aparece un pico relativo de reflectividad que coincide con la banda verde del espectro visible, y causa el color con el que nuestro ojos perciben la vegetación vigorosa.

Cuando se aproxima la caída otoñal de las hojas, la clorofila ejerce una menor influencia, lo que explica su mayor reflectividad en la banda roja y, en definitiva, su color amarillento (verde + rojo). En algunas especies resulta destacada la acción de otro pigmento, la antocianina, buen reflector de la porción roja del espectro, que causa ese color en épocas de senescencia.

En cuanto a la elevada reflectividad en el infrarrojo cercano, parece deberse a la estructura celular interna de la hoja. En concreto, la capa esponjosa del mesófilo, con sus cavidades de aire internas, ejerce un papel protagonista, al difundir y dispersar la mayor parte de la radiación

incidente en esta banda del espectro (Harris, 1987, pp. 17-20). Por ello, la hoja sana ofrece una alta reflectividad en el infrarrojo cercano (entre 0,7 y 1,3 μm), en claro contraste con la baja reflectividad que ofrece en el espectro visible, especialmente con la banda roja. Puesto que la estructura de la hoja es muy variada según las especies, esta banda también resulta idónea para discriminar entre plantas, incluso entre aquellas que no podrían separarse en el espectro visible.

A partir de 1,4 μm el efecto absorbente del agua es muy claro, por lo que la reflectividad de la vegetación sana se reduce drásticamente en el infrarrojo medio. Las medidas de laboratorio muestran una notable diferencia en esta región del espectro entre las hojas secas y las infiltradas con agua (Knipling, 1970; Curran, 1985). En experimentos con hojas de higuera, la reflectividad de la hoja seca alcanzó hasta cuatro veces el valor de la hoja húmeda, para la banda situada en torno a 1,9 μm (Short, 1982). Entre estas bandas donde la absorción del agua es más clara, se sitúan dos picos relativos de reflectividad, en torno a 1,6 μm y 2,2 μm. Queda patente, pues, que la observación en esta región del espectro es de gran interés para conocer el estado de vigor de la hoja, en función de su contenido de humedad.

Las curvas de reflectividad aquí presentadas pueden modificarse en función de la morfología de la hoja. Así, las hojas aciculares tienden a una mayor absortividad en todas las longitudes de onda, mientras las plantas desérticas, de tronco suculento, reflejan una mayor radiación que otras especies mesofíticas (Gates et al, 1965).

Obviamente el sensor no mide hojas aisladas, sino agrupaciones de hojas formando masas de vegetación, por lo que intervienen otros elementos adicionales que complican el esquema previo. Algunos de ellos son: el ángulo de elevación solar, directamente relacionado con la proporción de sombras que detecta el sensor; las características del suelo que sustenta la vegetación; la geometría de la cubierta vegetal; su estado fenológico, etc.

Pese a la complejidad final, es evidente que estas ideas nos sirven para centrar el estudio científico de la vegetación a partir de sensores espaciales. De ellas, resulta evidente que el contraste más nítido en la reflectividad espectral de la vegetación sana se produce entre las bandas visibles, especialmente el rojo (en torno a 0,645 μm), y el infrarrojo cercano (0,7 a 1,3 μm). De ahí que podemos enunciar, como principio genérico, que cuanto mayor sea el contraste entre ambas bandas, mayor será el vigor de la vegetación, y más clara su discriminación frente a

otros tipos de cubierta. Queda implícito que cualquier fuente de estrés en la vegetación se mostrará en un comportamiento espectral más o menos alejado del anteriormente expuesto. La hoja senescente o enferma tiende a perder actividad clorofílica y -en consecuencia- a ofrecer una menor absortividad en las bandas azul y roja del espectro visible. El aumento consecuente de la reflectividad en estas bandas elimina el máximo relativo antes situado en el verde, por lo que la hoja tiende a mostrar un color amarillento. Por el contrario, en el infrarrojo cercano se produce una reducción de la reflectividad, como consecuencia de un deterioro en la estructura celular de la hoja. La curva espectral, por tanto, se hace más plana, menos cromática (Murtha, 1978; Knipling, 1970).

Este comportamiento espectral teórico de las cubiertas vegetales ha sido la base para obtener una serie de índices de vegetación, que se basan -entre otros factores- en el contraste entre las bandas roja e infrarrojo cercano del espectro. Se construyen a partir de la combinación lineal entre estas dos bandas, cuando disponemos de una imagen multiespectral. Muy variados en su desarrollo, todos ellos tienden a presentar de forma más nítida las características de la vegetación, facilitando su aislamiento de otras cubiertas y la detección de su estado vital (Meliá et al, 1986; Meliá, 1986; Huete, 1987). Más adelante se estudiará el interés temático de estas transformaciones (6.7.2).

2.5.3. Características del suelo en el espectro óptico

Como consecuencia del efecto de pantalla provocado por la cubierta vegetal, no resulta sencillo obtener información del sustrato geológico a partir de sensores espaciales. Sin embargo, pueden obtenerse algunos datos indirectos sobre las características del suelo/litología gracias a las anomalías que puedan detectarse en esa cubierta vegetal. Ejemplos de este tipo de anomalías son: distribución peculiar de especies, crecimiento o densidad irregular, o alteraciones de la pigmentación o del ciclo fenológico. Si bien no todos estos fenómenos pueden ser imputados al sustrato geológico, algunos estudios han demostrado la posibilidad de inferir valiosa información de éste a partir de la vegetación (Milton et al, 1983; Lulla, 1985). Esta técnica se ha bautizado con el nombre de Geobotánica, demostrando gran interés para estudios regionales (Bruce y Hormsby, 1987).

En lo que atañe a los suelos desnudos, su comportamiento espectral es mucho más uniforme que el de la vegetación, mostrando una curva

espectral bastante plana y de carácter ascendente. Los principale factores que intervienen en este caso son la composición química de suelo, su textura, estructura y contenido de humedad.

La composición química es la causa del color dominante con el qu percibimos el suelo (fig. 2.12). Los de origen calcáreo tienden al colo blanco, indicando una alta reflectividad en todas las bandas visibles. Po su parte, los suelos arcillosos ofrecen una mayor reflectividad en el rojo como consecuencia de su alto contenido en oxido de hierro.

Respecto a las características físicas del suelo, puede afirmarse, e términos generales, que la reflectividad espectral resulta tanto mayo cuanto se trate de suelos más groseros, apelmazados, secos y sin materia orgánica. El contenido de humedad es uno de los elementos destacado importantes en la reflectividad de las longitudes de onda más largas, infrarrojo cercano y medio, como consecuencia de la alta absortividad del agua en estas bandas. De hecho, un suelo de textura gruesa puede presentar una reflectividad menor que los finos cuando el contenido de humedad es bajo (Mulders, 1987).

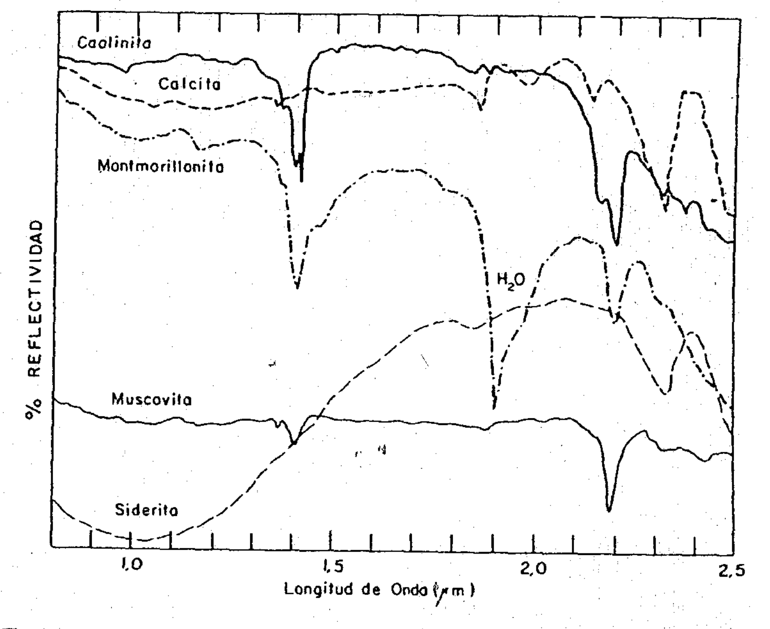


Fig. 2.12 - Espectros de laboratorio para distintos minerales (adaptado de Elachi, 1987)

Como es bien sabido, textura, estructura y contenido de humedad están altamente relacionados. Por ejemplo, un suelo arcilloso tiende a tener un alto contenido de humedad, fuerte estructura y fina textura, lo que supone una baja reflectividad. En contraste, un suelo arenoso tiende a tener una débil estructura y bajo contenido de humedad, por lo que presentará una reflectividad más elevada (Curran, 1985). A ello convendría añadir el efecto de la materia orgánica en el suelo, que tiende a oscurecerle, y, en consecuencia, a reducir su reflectividad.

2.5.4. Características del agua en el espectro visible.

Las superficies acuáticas absorben o transmiten la mayor parte de la radiación visible que reciben, siendo mayor su absortividad cuanto mayor sea la longitud de onda. La curva espectral, por tanto, es similar a la del suelo, aunque de sentido contrario. La mayor reflectividad del agua clara se produce en el azul, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo cercano, donde ya es prácticamente nula. Por esta razón, la frontera tierra-agua es muy nítida en esta banda.

La variabilidad del agua es mejor detectable en las longitudes de onda más cortas (azul y verde), que hemos de relacionar con su profundidad, contenido de materiales en suspensión (clorofila, arcillas y nutrientes), y rugosidad de la superficie.

La profundidad del agua influye directamente en el aporte de reflectividad derivado de los materiales de los fondos. En aguas poco profundas la reflectividad aumenta, por cuanto se produce un aporte de las características espectrales de los fondos. En consecuencia, la absortividad será tanto mayor cuanto más profunda sea la capa de agua.

En cuanto a su composición, diversos estudios han demostrado la posibilidad de emplear sensores especiales para cartografiar contenido de clorofila en el agua (López y Caselles, 1989). Si el agua ofrece importantes concentraciones de clorofila, la reflectividad en el azul tiende a descender, aumentando en el verde. Esto permite establecer una clara correlación, de signo negativo, entre la reflectividad del agua en la banda azul y el contenido de clorofila (fig. 2.13), lo que facilita localizar concentraciones de algas (Robinson, 1985) o el estudio de la eutrofización de embalses (Verdin, 1985).

El resto de los materiales en suspensión contribuyen también a aumentar la reflectividad, además de presentar una mayor turbidez. Por

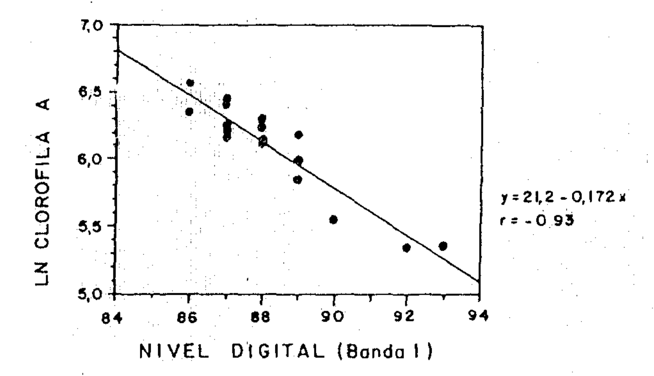


Fig. 2.13 - Relación entre contenido de clorofila en el agua y valores adquiridos por el sensor TM (López y Castelles, 1989. Reproducida con permiso de la Int. Journal of Remote Sensing)

último, la rugosidad de la superficie favorece la reflexión difusa, y en consecuencia una mayor reflectividad. En caso de aguas muy tranquilas la superficie se comporta de modo especular, con valores de reflectividad muy variados en función de la localización del sensor. En el caso de las medidas tomadas con sensores espaciales, los valores resultan extremadamente bajos.

La nieve, por su parte, ofrece un comportamiento muy distante del agua. Presenta una reflectividad elevada en las bandas visibles, reduciéndose drásticamente hacia el infrarrojo cercano. Varios autores han mostrado una disminución de esta reflectividad media, cuando aumenta el diámetro de los cristales (Hall y Martinec, 1985). Otros factores destacados son el grado de compactación de la nieve y la impureza (fig 2.14). La reflectividad es mayor para la nieve fresca que para la helada, mostrando los valores más bajos la nieve sucia. La reducción puede llegar hasta el 80 % para las bandas visibles (Hall y Martinec, 1985).

2.6. EL DOMINIO DEL INFRARROJO TÉRMICO

2.6.1. Características de la radiación energética en el infrarrojo térmico

De acuerdo con las leyes de Planck [2.4] y Wien [2.6], podemos fijar entre 8 y 14 μm la banda espectral en donde se manifiesta con mayor claridad la emitancia espectral de la superficie terrestre, de acuerdo a su temperatura (unos 300 K). A esta parte del espectro se le denomina infrarrojo térmico, puesto que nos permite detectar el calor que procede

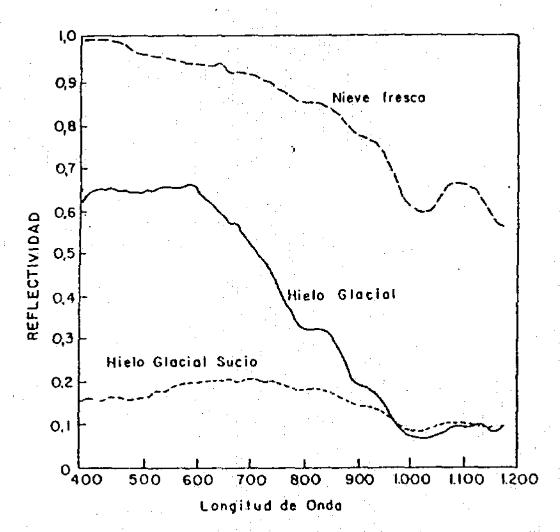


Fig. 2.14 - Reflectividad característica para distintos tipos de nieve (adaptado de Hall y Martinec, 1985)

de las distintas cubiertas. En definitiva, la radiancia espectral que recibe el sensor no es el resultado de la reflexión de la energía solar sobre la superficie terrestre, sino de la propia emitancia de ésta en función de su temperatura.

Como ya se vio más arriba [2.7], la emitancia espectral de un objeto está directamente relacionada con su temperatura absoluta. A la vez, ésta se relaciona con su capacidad para absorber la radiación solar incidente. De la fórmula [2.11] se deduce que ésta puede ser reflejada, absorbida o transmitida. Considerando que la transmisividad es prácticamente nula en el infrarrojo térmico, la expresión puede simplificarse indicando que, a esas longitudes de onda, la energía incidente o bien se refleja o bien se absorbe. Junto a ello, es preciso tener en cuenta que la emisividad espectral de un objeto es equivalente a su absortividad (ley de Kirchoff). En otras palabras, a mayor absorción, mayor emisión, por lo que podemos expresar la fórmula [2.11] indicando:

$$1 = \rho + \epsilon \qquad [2.13]$$

lo que, en resumen, significa que las superficies con alta reflectividad (caso de la nieve) son poco emisivas, mientras las poco reflectivas son altamente emisivas (como ocurre con el agua).

Como ya vimos anteriormente, la emisividad de un tipo de cubierta es una medida relativa, que pone en relación su emitancia con la de un cuerpo negro (fig. 2.15). Una alta emisividad (cercana a 1) indica que un objeto absorbe y radia una gran proporción de la energía incidente, mientras una baja emisividad considerablemente inferior a 1, refiere a un objeto que absorbe y radia una pequeña proporción de la energía incidente. En el caso de las cubiertas de interés medio ambiental, la mayor emisividad, se presenta en la vegetación densa (0,99) y el agua (0,98), mientras los valores más bajos corresponden a los suelos arenosos (0,90), nieve (0,80) y metales (0,16). El contenido de humedad modifica notablemente estos valores. Así en suelos arenosos se han medido incrementos de emisividad de 0,90 a 0,94 al aumentar un 8 % el contenido de humedad (Mulders, 1987). Los valores de emisividad se calculan para una temperatura media, en este caso en torno a 20 °C (Curran, 1985).

A partir de la medida de la emisividad puede estimarse la emitancia de un objeto, conociendo su temperatura. En este sentido puede corregirse la ley de Stefan-Boltzmann, introduciendo el parámetro de emisividad:

$$M_n = \epsilon \sigma T^4 \qquad [2.14]$$

Esto implica que dos objetos situados a la misma temperatura pueden presentar emitancias radiantes distintas. De esta forma, parece evidente la necesidad de corregir los valores adquiridos por el sensor en esta banda con el factor de emisividad. Ésta puede estimarse siempre y cuando la cubierta detectada sea homogénea. En caso de un área con cubiertas muy

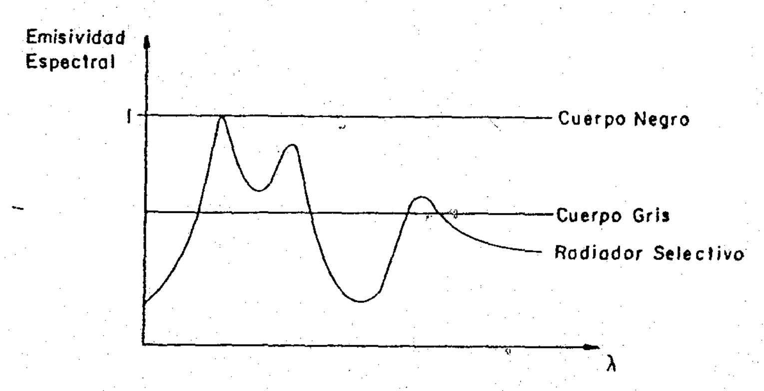


Fig. 2.15 - Emisividad espectral de distintos cuerpos (adaptado de Elachi, 1987)

distintas, cada una de ellas con su propia emisividad, el problema sería mucho más complejo. Habría de hacerse una corrección en función de las coberturas presentes en esa zona, conociendo la emisividad propia de cada una de ellas. En ocasiones se ha utilizado un mapa de ocupación del suelo previo para facilitar la corrección de emisividades (Caselles et al, 1984), aunque también puede basarse en una correlación de radiancias-temperaturas con medidas tomadas en el terreno o en estaciones meteorológicas (Caselles et al, 1983). Recientes trabajos han mostrado que, en cubiertas vegetales suficientemente densas, basta incorporar la emisividad de ésta y no la del suelo que la soporta, lo cual simplifica notablemente los cálculos (Sobrino et al, 1990).

Gracias a esta corrección puede estimarse la temperatura de un objeto a partir de las medidas obtenidas por el sensor. Ahora bien, es preciso tener en cuenta que estas medidas hacen referencia a la temperatura radiante de dicha cubierta, y no a su temperatura termométrica. La diferencia está motivada por dos factores: el efecto atmosférico, que más tarde comentaremos, y la propia emisividad de la cubierta. La relación puede expresarse como:

$$T_{rad} = \epsilon^{1/4}\, T_{ter} \qquad [2.15]$$

donde T_{rad}, indica la temperatura radiante de la cubierta; ϵ, la emisividad, y T_{ter}, la temperatura termométrica de esa misma cubierta. Es interesante puntualizar que sólo se trata de una estimación de la temperatura termométrica, puesto que la temperatura radiante está en relación con la temperatura de la superficie y no con la del interior de la cubierta. En el caso de la vegetación, por ejemplo, la temperatura de la capa más superficial tiende a estar más fría que el interior, por efecto de la evapo-transpiración de la planta. Pese a estos problemas, las predicciones pueden ser suficientemente fiables si los objetivos del estudio no requieren precisiones muy rigurosas.

Además de la emisividad, el comportamiento térmico de un objeto está relacionado con otros parámetros. Los más importantes son: capacidad térmica, conductividad, difusividad, inercia térmica e índice de calentamiento.

La capacidad térmica (C) indica la capacidad de la cubierta para almacenar calor. La capacidad térmica por unidad de masa se denomina calor específico (c). Las masas de agua poseen la mayor capacidad térmica, por lo que pueden almacenar más calor que la vegetación o los suelos.

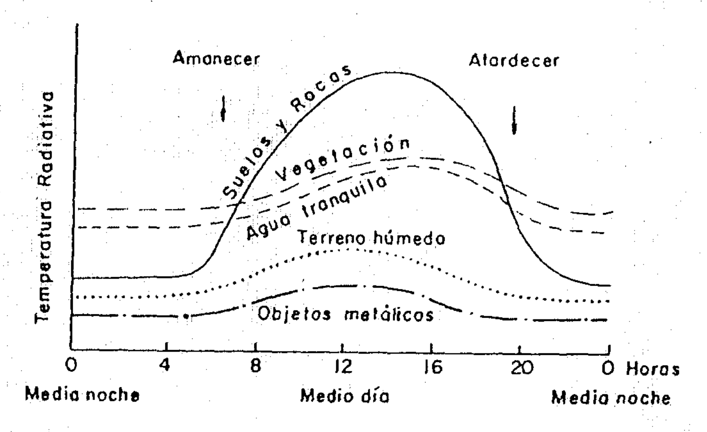


Fig. 2.16 - Inercia térmica estimada para diversas cubiertas (adaptado de Short, 1982)

La conductividad térmica (k), mide el ritmo al que se transmite el calor en esa cubierta. Las áreas urbanas son buenas conductoras de calor, mientras la vegetación o suelos resisten más esta transferencia. Por ello, la temperatura diurna en zonas de cubierta vegetal es fundamentalmente una función de la temperatura de la capa superior, y no de capas inferiores.

La difusividad térmica (K) es una medida del cambio de temperatura que se produce en el interior de la cubierta. En general, las superficies secas difunden los cambios de temperatura hacia abajo a una velocidad menor que las superficies húmedas.

Por último, la inercia térmica (P) hace referencia a la resistencia de un material a cambiar de temperatura. Este parámetro está directamente relacionado con la conductividad (k), el calor específico (c) y la densidad del material (D), de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$P = \sqrt{D\, c\, K} \qquad [2.16]$$

Los suelos secos y arenosos, con baja inercia térmica, ofrecen severos contrastes entre las temperaturas diurnas y nocturnas. En contraste, los suelos húmedos y arcillosos son mucho más resistentes al cambio y presentarán temperaturas diurnas inferiores y nocturnas superiores a los suelos secos (fig. 2.16). La inercia térmica es más fácilmente detectable en los momentos de máxima y mínima insolación, aproximadamente a las 12 am y pm, respectivamente.

En cuanto al índice de calentamiento, es función de la intensidad de la radiación y de la absortividad del objeto. La intensidad es menor en aquellas zonas arboladas, con nubes o con edificios que impidan la radiación directa. También está afectado directamente por la pendiente o exposición de las laderas.

2.6.2. Comportamiento espectral de la vegetación en el infrarrojo térmico

Las propiedades térmicas de la vegetación son bastante complejas, puesto que absorbe una gran cantidad de la energía solar que recibe para realizar la función clorofílica. Esta energía es re-emitida durante la noche para mantener el balance energético. Por esta razón, la temperatura media de las masas vegetales es más baja que el aire circundante a lo largo del día y más alta durante la noche.

La inercia térmica de la vegetación es alta, gracias a su importante contenido de humedad, que supone un elemento básico para la vida de las plantas. Desde el punto de vista térmico uno de los procesos más destacados en la señal ofrecida por la vegetación, es, precisamente, el que regula su ciclo hídrico. La evapo-transpiración supone una liberación de calor para realizar el tránsito del agua almacenada en las hojas al estado gaseoso. La pérdida de calor supone una reducción de la temperatura, por lo que las plantas tienden a estar más frías durante el día que su entorno. Por el contrario, durante la noche se re-emite la energía recogida de día, a la longitud de onda del térmico, lo que explica que ofrezca una mayor temperatura que las áreas limítrofes.

Dentro de este comportamiento caben múltiples matices. La evapo-transpiración está influida por la humedad atmosférica, velocidad del viento, disponibilidad de luz, temperatura del aire y humedad del suelo. La humedad atmosférica reduce la evapo-transpiración, mientras el resto de los factores la aumentan.

Otro factor importante que afecta a la emisividad de la vegetación es su extensión y densidad. Las grandes superficies verdes producen una elevada radiación, que puede ser incluso 30 veces superior a la correspondiente a los suelos vecinos (Curran, 1985). Ello reducirá la temperatura de estas superficies, tanto durante el día como durante la noche.

2.6.3. Los suelos y el agua en el dominio térmico

Respecto a los suelos, el factor más destacado es su contenido de humedad. A mayor humedad, el suelo presentará una mayor inercia térmica, puesto que aumenta su calor específico y conductividad. Esto le lleva a presentarse más frío durante el día y más cálido durante la noche que los suelos secos.

Otros parámetros a considerar serían la densidad, calor específico y conductividad. Diversos estudios de laboratorio han mostrado cómo el cuarzo presenta una densidad y calor específico similar a la arcilla, pero ofrece valores de conductividad mucho más elevados. Por ello, su inercia térmica es mayor, a la vez que cuenta con bajos valores de emisividad (0,90). Los suelos con alto contenido de materia orgánica ofrecen los valores más bajos de conductividad, por lo que tienden a mostrar más nítidamente las diferencias de temperatura entre el día y la noche.

De los párrafos anteriores, se deduce fácilmente que el agua posee la mayor inercia térmica. Esta resistencia a cambiar de temperatura es debida a su alta conductividad: la radiación incidente es fuertemente absorbida y transmitida a lo largo de la superficie por movimientos de convección, con lo que resulta más difícil que cambie de temperatura. Esto permite detectar con bastante facilidad plumas de agua provenientes de fuentes ajenas al entorno, como sería agua con materiales en suspensión o descargas de centrales nucleares.

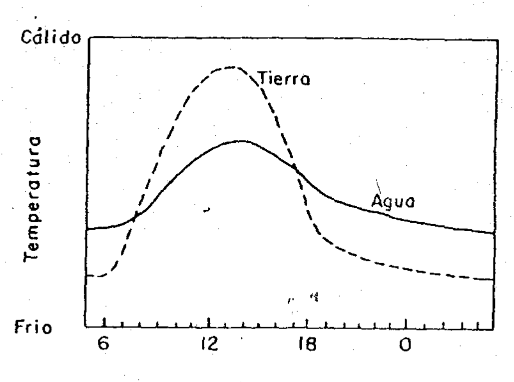


Fig. 2.17 - Contrastes térmicos entre tierra y agua (adaptado de Campbell, 1987)

En el caso de la nieve, la temperatura, tamaño del cristal y contenido de agua líquida afectan a la medida de la temperatura radiante. Como ya vimos, esta cubierta ofrece la emisividad más baja (o si se prefiere la mayor reflectividad), por lo que tiende a registrar más bajas temperaturas que el entorno. La observación en esta región térmica permite diferenciar la nieve de las capas nubosas, siempre que formen núcleos compactos.

2.7. LA REGIÓN DE LAS MICRO-ONDAS

2.7.1. Características de la radiación energética en la región de las micro-ondas.

La banda del espectro que se inicia en las longitudes de onda milimétricas se denomina región de las micro-ondas. Se trata de las longitudes mayores, utilizadas tanto en teledetección como en otras aplicaciones civiles y militares.

La observación en esta banda del espectro es complementaria y más compleja que la realizada en las bandas ópticas, por lo que el rango de aplicaciones es todavía muy inferior al registrado en éstas. No obstante, el interés por la teledetección a partir de micro-ondas ha crecido notablemente en los últimos años, gracias a que la atmósfera es prácticamente trasparente para estas longitudes de onda. Por esta razón, esta región resulta idónea para cartografiar áreas ecuatoriales, muy frecuentemente cubiertas por nubes. Por ejemplo, el rádar lateral aero-transportado (SLAR), permitió completar la primera cartografía de la cuenca del Amazonas y de varios países de Centro-América, detectando recursos hídricos y mineros antes desconocidos (Lillesand y Kiefer, 1987, pp. 474-76).

Una primera distinción a realizar en esta banda del espectro sería la que divide la observación remota en pasiva y activa. La primera, parte de similares principios a los empleados en otras bandas del espectro: el sensor se limita a recoger la energía que procede de las cubiertas situadas en la superficie terrestre. Por el contrario, los sensores activos no sólo recogen sino que también emiten su propio flujo de energía, controlándose, en función del tipo de aplicación, las características de dicho flujo.

Los sensores pasivos en esta banda se denominan radiómetros de micro-ondas. Son poco utilizados en teledetección, puesto que la emitancia de los objetos es difícilmente perceptible en esta banda. Para

las longitudes de onda que comprende, se emplea la aproximación de la ley de Planck calculada por Rayleigh-Jeans (Elachi, 1987):

$$M_\lambda = \frac{2\pi ck\ T}{\lambda^4} \qquad [2.17]$$

donde M_λ corresponde a la emitancia espectral, T a la temperatura en Kelvin, y λ a la longitud de onda. Las constantes tienen el mismo significado que en [2.4]. En esta región, los valores de M_λ son muy bajos, y existen frecuentes interferencias entre señales emitidas, reflejadas y transmitidas. Por ello, no es una técnica muy difundida en teledetección espacial, aunque se ha mostrado de gran interés para el estudio de capas de hielo y nieve. La cartografía de la Antártida a partir del radiómetro ESMR del satélite Nimbus-5, resulta muy significativa a este respecto (Hall y Martinec, 1985, pp. 141-149).

Pese al interés de estas experiencias, los sensores más importantes en este campo son los activos, que emiten su propio haz de micro-ondas para recoger posteriormente su reflexión sobre la superficie terrestre. Normalmente se conocen con el nombre de rádar (*Radio Detection and Ranging*). Por tratarse de un haz emitido artificialmente, pueden controlarse las condiciones de adquisición: ángulo, distancia, orientación, polarización, etc. Esto facilita la interpretación posterior de la señal, si bien es una tarea compleja ante la gran cantidad de factores que intervienen en el proceso.

Cuando se emite un haz de micro-ondas desde un rádar a la superficie terrestre, la mayor parte de ese haz es dispersado al contacto con ella. Según la naturaleza del sustrato, el haz principalmente se dispersa hacia la atmósfera (caso del suelo), se dispersa dentro del propio objeto (caso de la vegetación), o se refleja especularmente (caso del agua). En función de estos tres comportamientos el rádar registrará una señal de retorno muy distinta (fig. 2.18). Ese flujo viene determinado por el coeficiente de retro-difusión, de significado similar a la reflectividad en el espectro visible.

Desgraciadamente, como ocurre en otras bandas del espectro, tampoco aquí cada cubierta ofrece un comportamiento único y constante. Otros factores, que podríamos denominar medio ambientales, influyen en la señal finalmente detectada por el sensor. Entre ellos, los más importantes son: la rugosidad y geometría del terreno, el ángulo de incidencia del flujo y su polarización. Estos factores introducen una cierta variabilidad

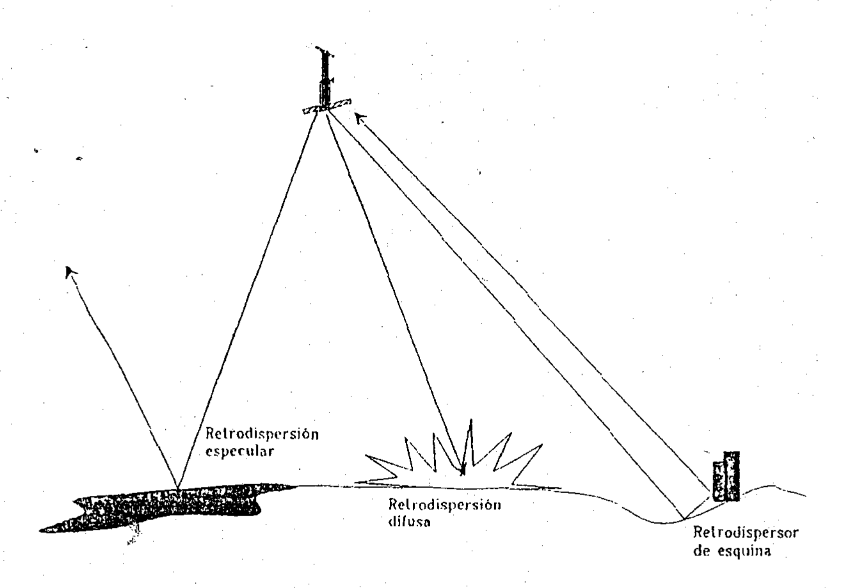


Fig. 2.18 - Distintos tipos de retro-dispersión (adaptado de Campbell, 1987)

en torno al coeficiente promedio de cada tipo de cubierta, principalmente afectado por su conductividad o constante dieléctrica. Con estos elementos, podemos abordar la ecuación fundamental del rádar:

$$P_r = \frac{P_t\, G^2\, \lambda^2\, \sigma}{(4\pi)^3\, r^4} \qquad [2.17]$$

donde P_r, indica la potencia retro-dispersada; P_t, la potencia emitida por el rádar, G es un factor de ganancia de la antena; r, indica la distancia entre el sensor y la cubierta, y σ la sección eficaz de retro-difusión.

Precisamente este último factor, σ, es el que implica una mayor complejidad, puesto que depende de diversos factores. Entre los más importantes se cuentan: la rugosidad del material y sus condiciones dieléctricas, y las condiciones del terreno, principalmente pendiente y orientación frente al flujo emitido.

En cuanto a la rugosidad, parece comprobado que incide directamente en la intensidad de la señal de retorno. Como ya hemos indicado, el

concepto de rugosidad es muy dependiente de la longitud de onda. En longitudes cortas una superficie relativamente llana puede aparecer como rugosa, mientras se comporta como lisa en longitudes mayores. Esta relación se concreta gracias al criterio de Rayleigh, que considera una superficie rugosa si la raíz cuadrática media de su variación altitudinal excede $\lambda/8 \cos \alpha$, siendo λ la longitud de onda de observación, y α el ángulo de incidencia. En pocas palabras, esto indica que a igual rugosidad del terreno, éste aparecerá tanto más liso cuanto se trabaje a longitudes de onda mayores, y/o con ángulos de incidencia mayores. Esta relación es muy importante, ya que en una superficie que aparece como rugosa, la dispersión de retorno se dirige a todas las direcciones y el sensor capta una fuerte señal. En cambio, si la cubierta aparece lisa la reflexión tiende a ser especular y la señal de retorno puede llegar a ser prácticamente nula. Este es el caso de las masas de agua, que aparecen con tonos oscuros en una imagen rádar.

Las características eléctricas de la cubierta juegan un papel tan destacado como la geometría de observación en la señal retornada al sensor. Una de las medidas de este comportamiento es la denominada constante dieléctrica compleja, que intenta medir la conductividad y reflectividad de un tipo de material. En términos generales, los materiales secos ofrecen una constante dieléctrica entre 3 y 8, mientras el agua ofrece un valor de 80. En consecuencia, la presencia de agua en el suelo o la vegetación puede alterar significativamente el pulso de retorno. Por esa razón, la vegetación -casi siempre cargada de humedad- tiende a ofrecer un pulso de retorno mayor que los suelos secos. También son buenos conductores las superficies metálicas, que ofrecen valores de retro-difusión bastante elevados.

Junto a la rugosidad, también conviene considerar la geometría del terreno: pendientes y orientaciones al ángulo de incidencia del rádar. En el caso de zonas urbanas, resulta muy frecuente obtener señales de retorno particularmente intensas, debido a la presencia de los denominados reflectores de esquina, que cambian la trayectoria de la señal incidente retornándola en la misma dirección de origen.

El efecto del ángulo de incidencia sobre el coeficiente de retro-difusión resulta asimismo muy destacado. A mayor ángulo, menor será el pulso de retorno, puesto que la dispersión también será menor. Si se combina un ángulo de incidencia bajo con una longitud de onda larga, el pulso del rádar puede penetrar a una cierta profundidad, consiguiendo interesante información sobre fondos de vegetación o suelos. También del ángulo de incidencia depende la información morfológica que

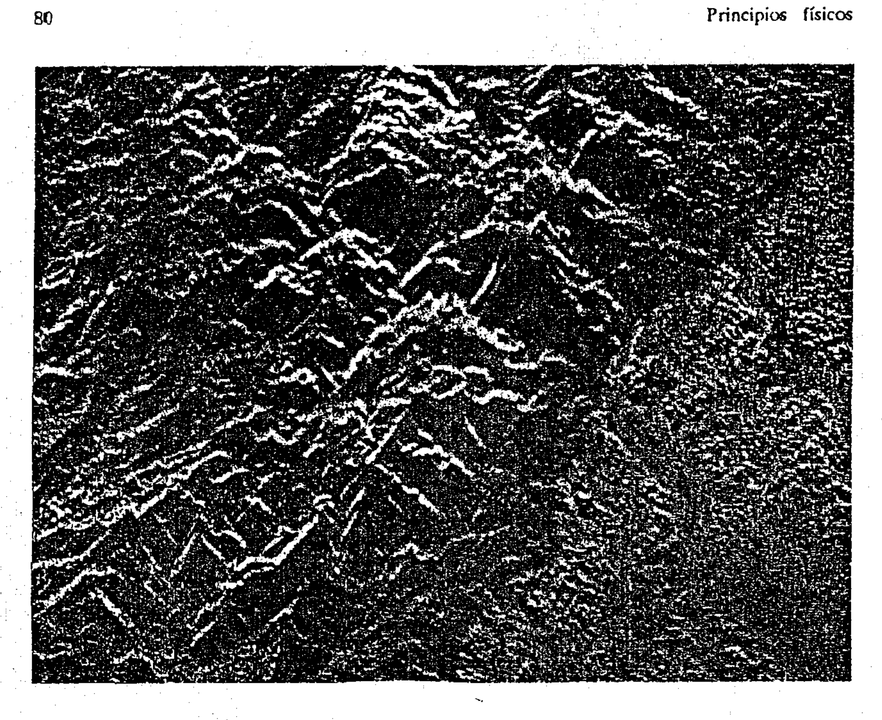


Fig. 2.19 - Morfología del terreno a partir de imágenes rádar

proporciona el rádar. Con ángulos bajos, el efecto de sombra se realza notablemente, aunque también lo hacen las deformaciones geométricas. Esta sombra es relativa a la orientación de la topografía frente a la antena. Si se varía la trayectoria del sensor, para la misma zona, pueden conseguirse efectos estereoscópicos. A partir de esa reconstrucción tri-dimensional se realza notablemente el estudio de la geología y geomorfología local (fig. 2.19).

Por último, la polarización refiere a la forma en la cual son transmitidas las señales del rádar. Una señal polarizada indica que su vibración se restringe a una dirección determinada. Las dos formas más importantes son la polarización semejante (Horizontal-Horizontal o Vertical-Vertical), y la cruzada (Horizontal-Vertical o Vertical-Horizontal), según se emita y reciba con la misma o distinta polarización. La dirección con que la señal está polarizada influye en el flujo de retorno, puesto que el eco del rádar es selectivo a la dirección de propagación.

2.7.2. Características de la vegetación en la región de las micro-ondas

En lo que afecta a la vegetación, la rugosidad es un elemento fundamental en la señal de retorno. La rugosidad es muy dependiente del tamaño, forma, orientación y número de hojas. Respecto a la conductividad, la constante dieléctrica es bastante alta y constante para la mayor parte de las masas vegetales, incrementándose con el mayor contenido de humedad durante la época de crecimiento. Cuando la vegetación pierde vigor o el aporte del suelo es mayor, la constante dieléctrica disminuye drásticamente. De aquí se deduce que es posible obtener información sobre la humedad del sustrato vegetal, siempre y cuando se trabaje a longitudes de onda largas y el ángulo de incidencia sea bajo. La profundidad de penetración en masas vegetales está también relacionada con las condiciones de humedad del suelo y con la polarización. Resulta mayor en suelos secos y con señales de polarización semejante (HH o VV), mientras se reduce en suelos húmedos o con señales de polarización cruzada (HV o VH).

2.7.3. Características del suelo y el agua

De los párrafos anteriores se deduce que los suelos rugosos y secos tendrán un mayor coeficiente de retro-difusión y, por tanto, aparecerán con tonos claros en las imágenes rádar. Si la señal se reduce, manteniendo otras condiciones constantes, se tratará normalmente de suelos más húmedos. En suelos secos la capacidad de penetración del rádar aumenta hasta llegar a varios metros si la longitud de onda es suficientemente larga (fig. 2.20). Los núcleos de población, altamente rugosos a longitudes largas, también aparecen con tonos claros, lo que permite discriminarlos frente a los espacios cultivados limítrofes (Meliá y Sobrino, 1987).

En cuanto al agua, la región de las micro-ondas proporciona una cierta capacidad de penetración, siempre que el ángulo de incidencia sea bajo y se trabaje con longitudes de onda largas. El agua, casi siempre refleja especularmente el pulso recibido, con lo que el retorno es bastante bajo. Ahora bien, si existe una cierta rugosidad superficial, por ejemplo oleaje, puede manifestarse en la imagen rádar, siempre que el ángulo de incidencia sea bajo (fig. 2.21).

Respecto al hielo y nieve, el pulso de retorno es muy dependiente de las condiciones del material. La edad, composición y compacidad de la capa de hielo, su rugosidad, geometría interna, y temperatura son factores destacados en el coeficiente de retro-difusión finalmente detectado por el sensor.

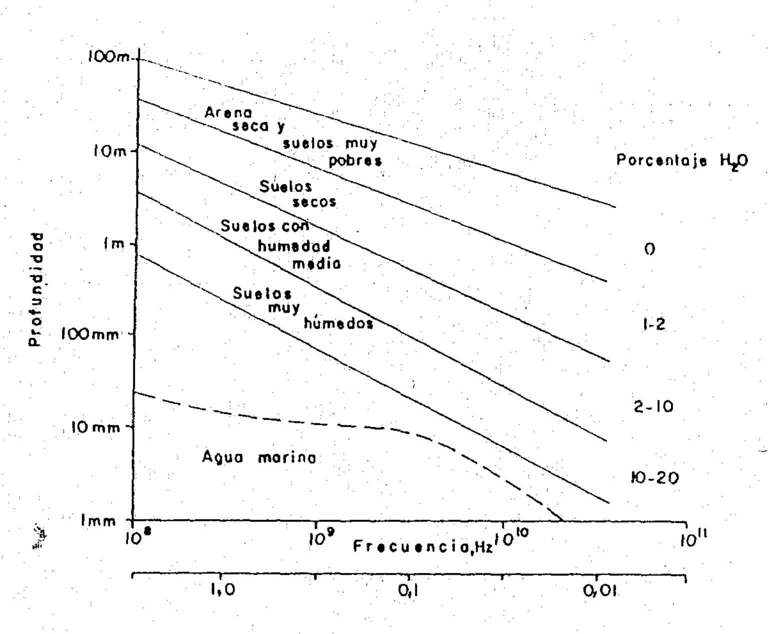


Fig. 2.20 - Relación entre humedad del suelo y capacidad de penetración del rádar a distintas longitudes de onda (adaptado de Trevett, 1986)

2.8. INTERACCIONES DE LA ATMÓSFERA CON LA RADIACIÓN ELECTRO-MAGNÉTICA

Hasta aquí hemos considerado la interacción de la radiación electro-magnética con las diversas coberturas terrestres prácticamente como si este proceso se desarrollara en el vacío. Obviamente, esta suposición es falsa, puesto que entre el sensor y la superficie terrestre se interpone la atmósfera, que interfiere de formas diversas con el flujo radiante.

Como es sabido, la atmósfera se compone de gases -anhídrido carbónico, oxígeno, ozono, nitrógeno y argón, principalmente-, vapor de agua y aerosoles. Entre estos componentes, el anhídrido carbónico, ozono y vapor de agua son los principales responsables de la interacción con la energía electro-magnética. Su efecto es triple: (i) absorción de la energía en determinadas bandas del espectro, lo que limita la observación espacial a aquellas bandas en donde esta absorción es menos intensa o nula; (ii) dispersión, de determinados flujos, en función de su longitud de onda, y (iii) emisión, como todo cuerpo caliente, que tiene su mayor importancia en el infrarrojo térmico. Estos procesos introducen modi-

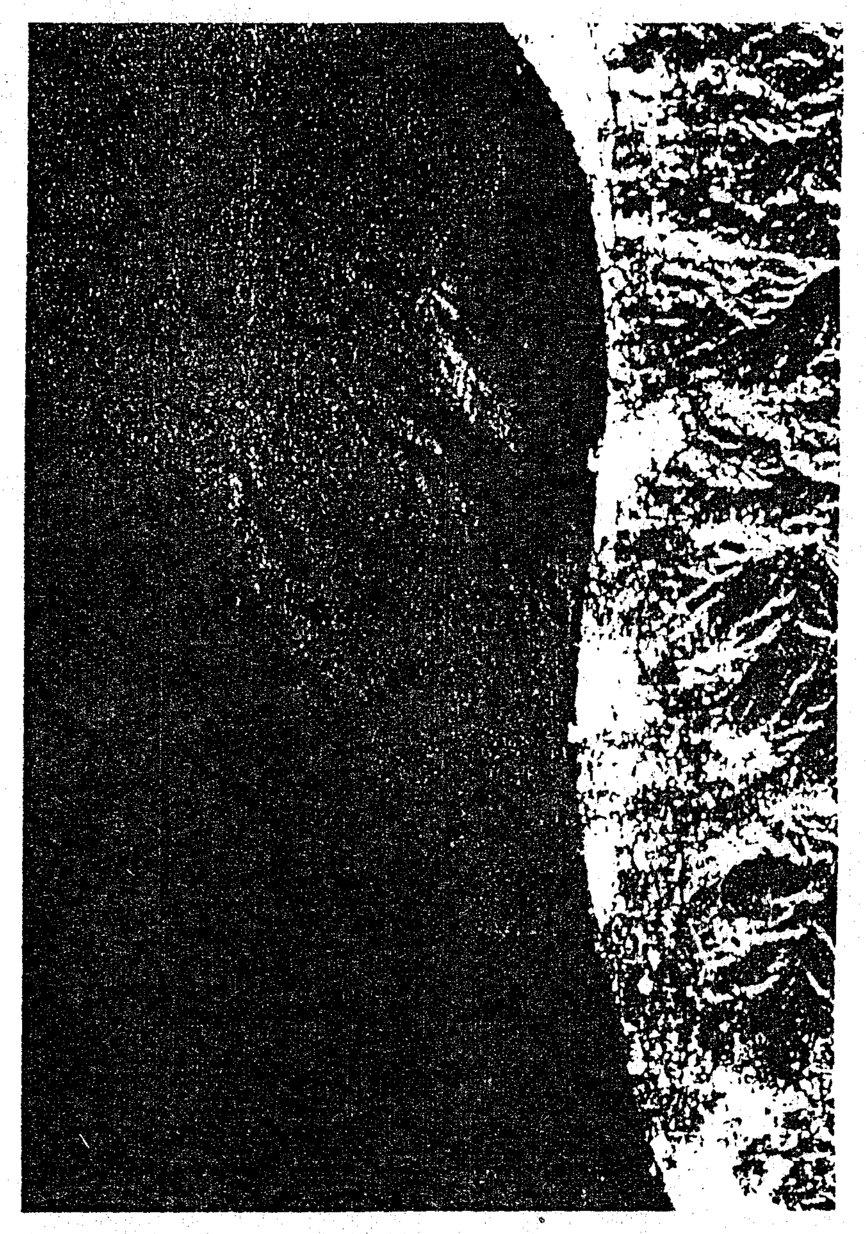


Fig. 2.21 - Imagen rádar de la costa portuguesa (Cortesía R.Núñez)

caciones, en ocasiones muy severas, en la radiación originalmente propagada entre la cubierta y el sensor.

2.8.1. Absorción atmosférica

La atmósfera se comporta como un filtro selectivo a distintas longitudes de onda, de tal forma que en algunas bandas del espectro elimina prácticamente cualquier posibilidad de observación remota. Los principales causantes de esta absorción son:

- Oxígeno atómico (O_2), que filtra las radiaciones ultravioleta por debajo de 0,1 μm, así como pequeños sectores en el infrarrojo térmico y las micro-ondas.
- Ozono (O_3), responsable de la eliminación de la energía ultravioleta, inferior a 0,3 μm, así como en un sector de las micro-ondas (en torno a 27 mm).
- Vapor de agua, con una fuerte absorción en torno a 6 μm y otras menores entre 0,6 y 2 μm.
- Anhídrido carbónico (CO_2), que absorbe en el infrarrojo térmico (15 μm), con importantes efectos en el infrarrojo medio, entre 2,5 y 4,5 μm.

Como consecuencia de esta absorción, la observación espacial se reduce a determinadas bandas del espectro, conocidas como ventanas atmosféricas, en donde la transmisividad de la atmósfera es suficientemente alta (fig. 2.22). Las principales ventanas atmosféricas son las siguientes: (i) espectro visible e infrarrojo cercano, situada entre 0,3 y 1,35 μm; (ii) varias en el infrarrojo medio: de 1,5 a 1,8 μm, 2,0 a 2,4 μm,

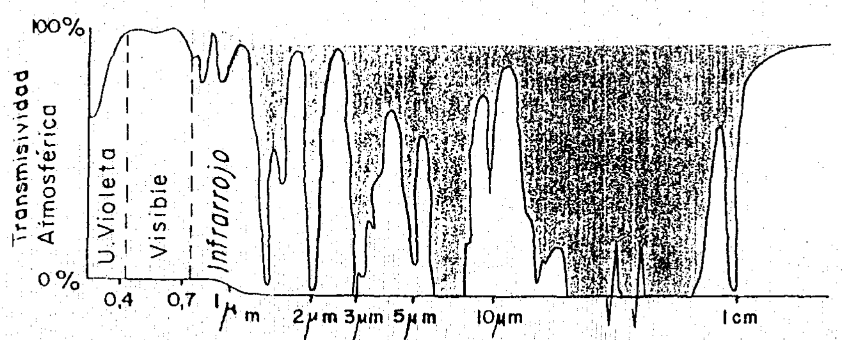


Fig. 2.22 - Transmisividad de la atmósfera a distintas longitudes de onda (adaptado de Lillesand y Kiefer, 1987)

2,9 a 4,2 μm, y 4,5 a 5,5 μm; (iii) infrarrojo térmico, entre 8 y 14 μm, y (iv) micro-ondas, por encima de 20 mm, en donde la atmósfera es prácticamente transparente.

Estas ventanas atmosféricas son idóneas para realizar procesos de teledetección, por lo que el diseño de los sensores espaciales tiende a ajustarse a estas bandas, evitando interferencias extrañas al fenómeno que pretende observarse. Cuando se pretende, por el contrario, observar la la atmósfera en lugar de la superficie terrestre, los sectores espectrales más convenientes son, precisamente, aquellos en donde la absorción atmosférica es alta. Por esta razón, los satélites meteorológicos incorporan bandas en estas regiones del espectro. Este es el caso de la banda 2 del satélite Meteosat, comprendida entre 5,7 y 7,1 μm, que se diseñó para estudiar el contenido de vapor de agua en la atmósfera (fig. 2.23).

2.8.2. Dispersión atmosférica

Con ser de gran importancia, el efecto de absorción de la atmósfera puede paliarse simplemente situando las bandas de observación en áreas donde la transmisividad sea alta. Por ello, no resulta muy habitual encontrar este problema en la interpretación de imágenes (salvo en caso

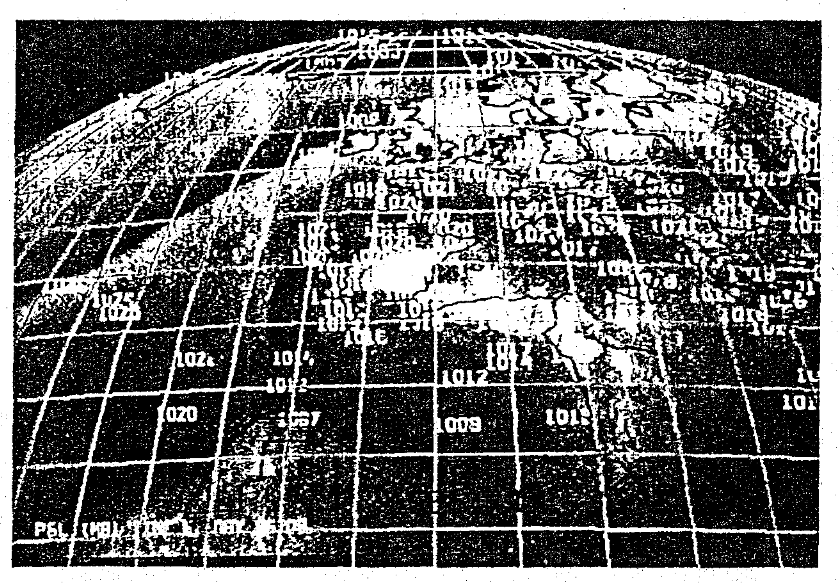


Fig. 2.23 - Imagen del Meteosat sobre la banda de absorción del vapor de agua. Cortesía V.Moreno (ISEL-INM).

de coberturas nubosas, normalmente evitables gracias a una buena selección de la imagen). Mucho más complejo, sin embargo, es soslayar el efecto de dispersión causada por la atmósfera, presente -en mayor o menor grado- en cualquier imagen adquirida con sensores remotos.

La dispersión de la radiación electro-magnética es causada por la interacción entre ésta y los gases y partículas atmosféricas en suspensión. La reflexión consiguiente a ese choque supone un aporte adicional a la radiancia proveniente de la superficie terrestre (luz atmosférica). En definitiva, se reduce la radiancia directa, aumentándose la difusa. Puesto que las partículas atmosféricas son muy variables en el tiempo y en el espacio, resulta muy complejo cuantificar su influencia final en la imagen adquirida por el sensor. Pese a ello, convendrá tener en cuenta este factor, especialmente cuando se pretenda convertir los valores digitales de la imagen a parámetros físicos (6.5.2.4), o se aborden estudios multi-temporales (6.8.3.4.4).

La dispersión *Rayleigh* afecta a las longitudes de onda más cortas (fig. 2.24). Es la más conocida y la de mayor influencia en teledetección, causante, por ejemplo, del color azul del cielo. En fotografía aérea, es muy claro su efecto por el tono azulado que presentan los fotogramas cuando se realizan desde cierta altura. Cualquier observador distante puede comprobar este resultado, especialmente en los meses de verano, cuando se difumina el paisaje al divisarlo a largas distancias (calima).

Los principales causantes de la dispersión atmosférica son los aerosoles y el vapor de agua. Los aerosoles son partículas en suspensión de origen muy diverso: oceánico, debidas al movimiento de las aguas, o continental, polvo en suspensión o partículas emitidas por combustión. En función de su origen y características poseen muy variados tamaños, lo que implica distintos tipos de dispersión, ya que ésta es muy dependiente de su diámetro. De esta forma, se habla de dispersión *Rayleigh*, cuando afecta a longitudes de onda inferiores al diámetro de la partícula; dispersión *Mie*, cuando se trata de partículas de diámetro similar a la longitud de onda, y de dispersión no selectiva, cuando se mencionan las partículas de mayor tamaño.

En cuanto a la dispersión *Mie*, es también dependiente de la longitud de onda, si bien en menor grado que la anterior. Aerosoles y polvo atmosférico son los principales responsables de este tipo de dispersión, aunque también está presente en incendios forestales o en brumas costeras.

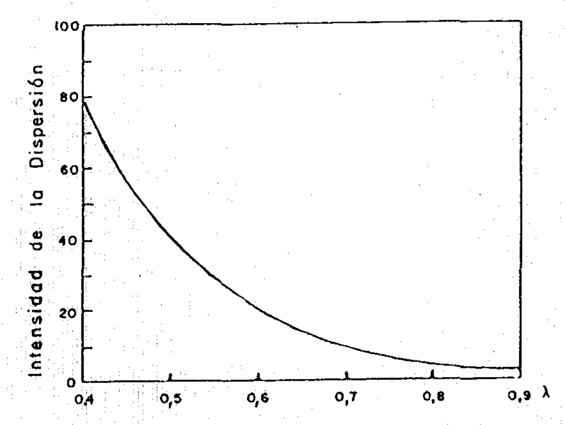


Fig. 2.24 - Dispersión atmosférica a distintas longitudes de onda (adaptado de Campbell, 1987)

Por último, la dispersión no selectiva afecta por igual a diversas longitudes de onda. En consecuencia, las nubes o nieblas tienden a aparecer blancas, ya que dispersan por igual toda la luz visible.

Los procesos de dispersión son muy complejos y difíciles de cuantificar en la imagen resultante. Normalmente no se dispone de datos coetáneos a la adquisición de ésta, por lo que la corrección atmosférica se basa en relaciones entre elementos de la propia imagen (6.5.2.3). Esta estimación puede ser burda en algunos casos, y dificulta, en última instancia, el uso de las imágenes adquiridas por sensores espaciales como medida cuantitativa de parámetros bio-físicos (6.8.1).

2.8.3. Emisión atmosférica

El efecto de emisión atmosférica resulta fundamental en el trabajo dentro del infrarrojo térmico, si se pretenden obtener mediciones de temperatura a partir de las imágenes espaciales. Al igual que cualquier cuerpo por encima del cero absoluto, la propia atmósfera emite su propia energía calorífica, por lo que ese parámetro debe considerarse para estimar la emitancia espectral originalmente proveniente del suelo. Esos procesos de corrección se han abordado por diversos autores (Caselles et al, 1988; Caselles y Sobrino, 1989).

3. SISTEMAS ESPACIALES DE TELEDETECCIÓN

3.1. TIPOS DE SISTEMAS

Como ya se indicó en el primer capítulo, un sistema de teledetección requiere, al menos, tres componentes: foco energético, superficie terrestre y sensor. Del primero y segundo se trató en el epígrafe sobre principios físicos. En éste se aborda el estudio de las características del sensor y de la plataforma que lo sustenta.

Entre las variadas formas de clasificar los sensores remotos, una de las más habituales considera su procedimiento de recibir la energía procedente de las distintas cubiertas. En este sentido, se habla de dos tipos de sensores: (i) pasivos, cuando se limitan a recibir la energía proveniente de un foco exterior a ellos, y (ii) activos, cuando son capaces de emitir su propio haz de energía. Estos últimos son, lógicamente, más flexibles, puesto que no dependen tanto como los primeros de las condiciones exteriores al sistema sensor-Tierra.

Una ulterior clasificación entre los sensores pasivos, considera su procedimiento para grabar la energía recibida. De acuerdo a ello, puede hablarse de sensores fotográficos, óptico-electrónicos y de antena. Los primeros resultan muy familiares, puesto que se basan en las mismas técnicas aplicadas en la fotografía convencional. El resto son peor conocidos por el gran público, si bien sistemas similares se utilizan rutinariamente: tubos de vidicón en televisión comercial, equipos de barrido o *scanners* en exploración médica, y radiómetros de micro-ondas en radio difusión.

En cuanto a los sensores activos, el equipo más utilizado es el rádar, bastante utilizado en aplicaciones militares, así como en control del tráfico aéreo. El rádar trabaja en la región de las micro-ondas. Por su parte, el lídar, luz polarizada o láser, opera en el visible e infrarrojo cercano.

Antes de comentar con mayor detenimiento cada uno de estos sensores, conviene analizar algunos conceptos previos que les afectan a todos, y son muy útiles para centrar su rango de aplicaciones a distintos problemas medio ambientales.

3.2. RESOLUCIÓN DE UN SISTEMA SENSOR

De acuerdo con algunos autores, podemos definir la resolución de un sistema sensor como su habilidad para registrar, discriminándola, información de detalle (Estes y Simonett, 1975). Esta definición engloba varios aspectos que merecen un comentario más detallado. Por un lado, se habla de resolución de un sistema sensor, indicando que este concepto se refiere al conjunto del equipo, y no a cada una de sus partes. Dicho de otra forma, la resolución de un sensor depende del efecto combinado de sus distintos componentes. Una mejora en la lente -por ejemplo- no supondrá necesariamente adquirir fotografías con mayor resolución, si no se acompaña de una película de mayor sensibilidad, o no se modifican las condiciones de exposición.

Los términos de la definición "discriminando" e "información de detalle" merecen también una breve reflexión. Ambos son relativos al propósito y al entorno geográfico del proyecto que se esté abordando. La separabilidad entre objetos está en íntima relación con la escala de trabajo y con la complejidad del paisaje. Por ejemplo, pueden detectarse algunos rasgos geográficos, como ríos o carreteras, de anchura inferior a la resolución espacial del sensor, siempre y cuando exista suficiente contraste radiométrico entre la señal proveniente de estos rasgos y la de cubiertas vecinas. En otras palabras, cuanto mayor sea ese contraste entre cubiertas, más fácilmente se distinguirán éstas. En cuanto al significado de "información de detalle", conviene considerar que se refiere no sólo al detalle espacial que proporciona el sensor, sino también al número y anchura de las bandas del espectro que alberga, a su cadencia temporal, y a su capacidad para distinguir variaciones en la energía que detecta (Campbell, 1987). En definitiva, el concepto de resolución implica, al menos, cuatro manifestaciones: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

3.2.1. Resolución espacial

Este concepto designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen. En un sistema fotográfico, suele medirse como

la mínima separación a la cual los objetos aparecen distintos y separados en la fotografía. Se mide en unidades de longitud (mm sobre la foto, ó m sobre el terreno), y depende de la longitud focal de la cámara y de su altura sobre la superficie.

Por su parte, en los sensores óptico-electrónicos, se prefiere utilizar el concepto de campo de visión instantáneo (*instantaneous field of view*, IFOV). El IFOV se define como la sección angular, medida en radianes, observada en un momento determinado. No obstante, se suele utilizar normalmente la distancia sobre el terreno que corresponde a ese ángulo, teniendo en cuenta la altura de vuelo y la velocidad de exploración del sensor. Simplificando las cosas, esa distancia se corresponde al tamaño de la mínima unidad de información incluida en la imagen, que se denomina pixel. Esta es la medida más generalizada de resolución espacial, aunque también se emplean otros términos más complejos, como ERE (*effective resolution element*) o EIFOV (*effective instantaneous field of view*), que consideran la señal detectada como una función modulada compuesta (Townshend, 1980).

En cualquier caso, conviene considerar que la resolución espacial de un sensor óptico-electrónico depende de varios factores, como son la altura orbital, velocidad de exploración, y número de detectores. En cuanto a los sensores de antena, su resolución depende del radio de apertura, de la altura de la plataforma, y de la longitud de onda a la que trabajen. Cuanto mayor sea el radio, y menor la altitud y la longitud de onda, la resolución será tanto más detallada.

La resolución espacial de los sensores de observación terrestre en funcionamiento recoge un rango bastante amplio. Los satélites de recursos naturales, diseñados para adquirir información sobre áreas muy heterogéneas, suelen contar con resoluciones de cierto detalle: desde los 10 x 10 m del sensor SPOT-HRV, hasta los 120 x 120 m del canal térmico del Landsat-TM. Otro grupo de satélites, orientado hacia aplicaciones más globales, caso del HCMM-HCMR, MOS-VTIR, Nimbus-CZCS o NOAA-AVHRR, facilitan pixels de un tamaño comprendido entre 500 y 1.100 m de lado. En el último extremo del abanico estarían los satélites meteorológicos de órbita geoestacionaria (Meteosat, GOES, GMS), que ofrecen una cubierta global de la superficie terrestre, con pixels de hasta 5 km.

La resolución espacial tiene un papel protagonista en la interpretación de la imagen (5.3.2 y 6.8.1.3), por cuanto marca, de alguna forma, el nivel de detalle que ésta ofrece. Con la salvedad antes referida, parece

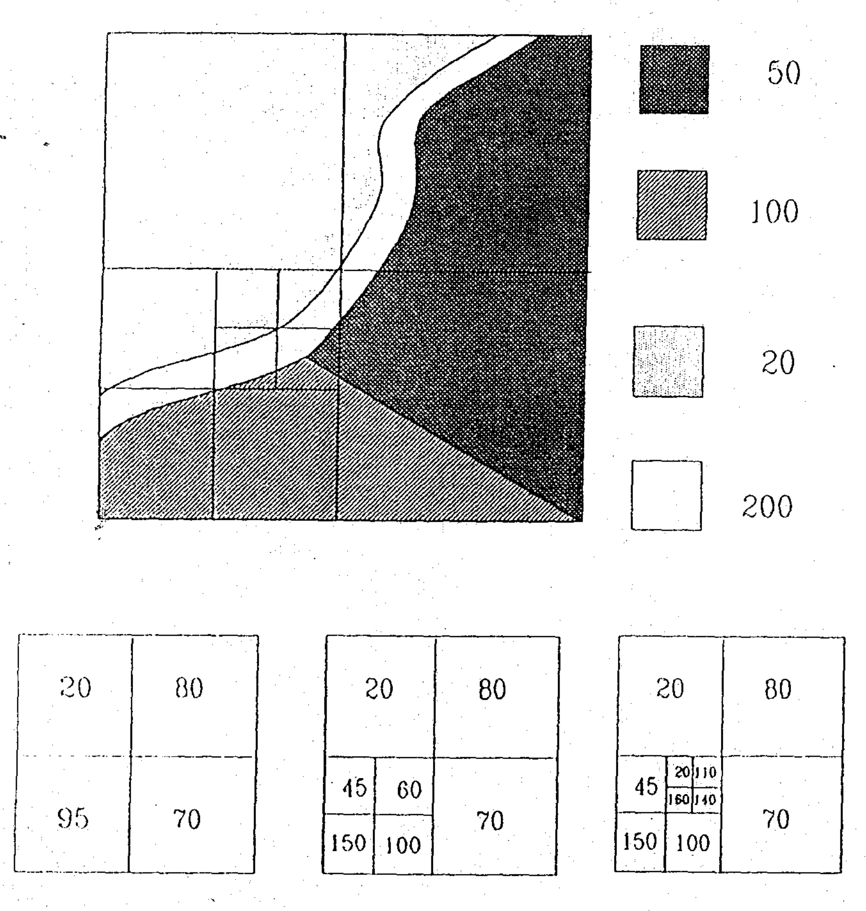


Fig. 3.1 - Efectos de la resolución espacial sobre la señal recogida por el sensor

obvio decir que sólo son discriminables sobre la imagen elementos de tamaño superior, como mínimo, al del pixel, si bien diversos autores han demostrado que este umbral suele elevarse a cuatro veces ese tamaño mínimo (Jensen, 1986, p. 113). En consecuencia, la resolución espacial está en estrecha relación con la escala de trabajo y con la fiabilidad finalmente obtenida en la interpretación. Cuanto menor sea el tamaño del pixel, menor también la probabilidad de que éste sea un compuesto de dos o más cubiertas fronterizas. Un pixel mixto, viene definido por una señal intermedia a las distintas cubiertas que lo componen. En consecuencia, puede no asemejarse a ninguna de ellas, lo que dificultará

notablemente su correcta identificación (fig. 3.1). Sin embargo, en el caso concreto de algunas cubiertas, singularmente las urbanas, se ha comprobado que la resolución espacial puede afectar negativamente a la interpretación, cuando ésta se realiza digitalmente (6.8.1.3).

3.2.2. Resolución espectral

Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. En el capítulo anterior se puso en evidencia el interés de contar con información multi-espectral; esto es, de registrar simultáneamente el comportamiento de los objetos en distintas bandas del espectro. En este sentido, un sensor será tanto más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione, ya que facilita la caracterización espectral de las distintas cubiertas. A la vez, conviene que esas bandas sean suficientemente estrechas, con objeto de recoger la señal sobre regiones coherentes del espectro. Bandas muy amplias suponen registrar un valor promedio, que puede encubrir la diferenciación espectral entre cubiertas de interés (fig. 3.2).

Entre los sensores espaciales, la menor resolución espectral corresponde al rádar y a los sistemas fotográficos. El primero trabaja normalmente en un solo canal, mientras la fotografía puede ofrecer películas pancromáticas, infrarrojo b/n, color natural o infrarrojo color. Por el contrario, los sensores óptico-electrónicos ofrecen un amplio rango de bandas, si bien se presentan problemas de transmisión de datos para aumentar ese número. En este sentido, el sensor Landsat-TM, que cuenta con siete canales, sufrió importantes problemas como consecuencia de un fallo en la red de satélites relés, imprescindible para la recepción de sus imágenes. El proyecto de estación orbital (EOS) puede incorporar -en un inmediato futuro- sensores mucho más sofisticados. De hecho, se están haciendo interesantes experiencias con un sensor, denominado HIRIS (*High Resolution Imaging Spectrometer*), dotado de 196 canales, distribuidos entre el visible y el infrarrojo cercano (Goetz, 1987)

La elección del número, anchura y localización de las bandas que incluye el sensor está estrechamente relacionada con los objetivos de su diseño. Para un sensor dedicado a fines meteorológicos, basta situar una sóla banda en el visible, puesto que no existen diferencias cromáticas en las nubes. Por el contrario, será conveniente que incluya una o dos bandas en el térmico (que le permitan conocer la temperatura de dichas nubes), y otra en el infrarrojo medio, en donde puede observarse el contenido de humedad en la atmósfera. Ésta es, precisamente, la

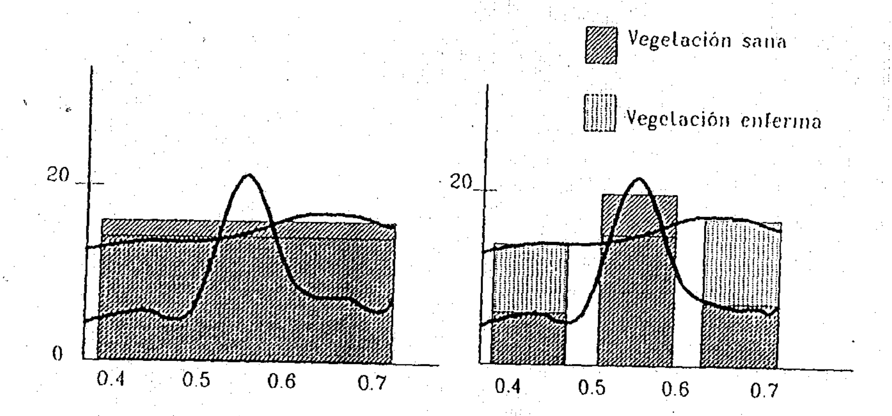


Fig. 3.2 - Efecto de la resolución espectral en la discriminación de cubiertas

distribución de bandas que recoge el sensor a bordo del satélite europeo Meteosat.

3.2.3. Resolución radiométrica

Hace mención a la sensibilidad del sensor, esto es, a su capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. En el caso de los sistemas fotográficos, la resolución radiométrica del sensor se indica por el número de niveles de gris recogido en el film. Para los óptico-electrónicos, la imagen habitualmente se presenta en formato digital, gracias a una conversión analógico-digital realizada a bordo del satélite. El número de valores que incluye ese rango -ésto es, el número máximo de niveles digitales de la imagen-, suele identificarse con la resolución radiométrica del sensor. Este rango de codificación varía con los distintos sensores. Inicialmente los Landsat-MSS, ofrecían un rango de 128 niveles de codificación por pixel, 64 para el infrarrojo cercano. Actualmente, la mayor parte de los sistemas ofrecen 256 niveles por pixel (de 0 a 255), con la notable excepción del NOAA-AVHRR, que trabaja con 1024 niveles.

Al igual que en los otros tipos de resolución, cuanto mayor sea la precisión radiométrica, tanto mejor podrá interpretarse la imagen. El número de niveles más adecuado depende del método que se siga en la interpretación. Si ésta es visual, conviene considerar que el ojo humano difícilmente percibe más de 64 niveles de gris, y no más de 200.000

tonalidades. Algunos autores estiman que basta con 16 niveles por color (4.096 tonalidades) para garantizar un análisis visual adecuado (Beaven, 1988), por lo que parece superfluo contar con 256 niveles digitales por banda (16 millones en una combinación coloreada de 3 bandas). Si se opta por la clasificación digital, la sensibilidad radiométrica puede ser mejor aprovechada, si bien algunos autores han demostrado que el aumento de 64 a 256 niveles no implica una mejora significativa en la clasificación de cubiertas vegetales (Tucker, 1979).

3.2.4. Resolución temporal

Este concepto alude a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor. En otras palabras, refiere a la periodicidad con la que éste adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación), así como del diseño del sensor, principalmente del ángulo de observación y de abertura.

La cadencia temporal de los sistemas espaciales varía de acuerdo a los objetivos fijados para el sensor. Los satélites meteorológicos están obligados a facilitar una información muy frecuente, ya que se dedican a observar un fenómeno de gran dinamismo. De ahí que la red de satélites geo-estacionarios (tipo Meteosat) proporcione una imagen cada 30 minutos, que complementa la obtenida a partir de los satélites de órbita polar, como el NOAA, que facilita imágenes cada 12 horas. Por el contrario, los satélites de recursos naturales ofrecen una cadencia mucho menor: entre los 16 días del Landsat y los 26 del SPOT.

3.2.5. Relaciones entre distintos tipos de resolución

Conviene aclarar que estos cuatro aspectos de la resolución están íntimamente relacionados. A mayor resolución espacial, disminuye habitualmente la temporal, y es previsible que se reduzca también la espectral y radiométrica (fig. 3.3). El principal problema se encuentra en la transmisión de las imágenes a la superficie terrestre. El aumento en cualquiera de los cuatro tipos de resolución, significa también un incremento considerable del volumen de datos que, tanto el sensor como la estación receptora tienen que procesar. Por esta razón, los primeros Landsat -dotados de media resolución espacial, espectral y radiométrica- podían disponer de un sistema de grabación a bordo, que les permitía adquirir imágenes de áreas no cubiertas por la red de antenas receptoras.

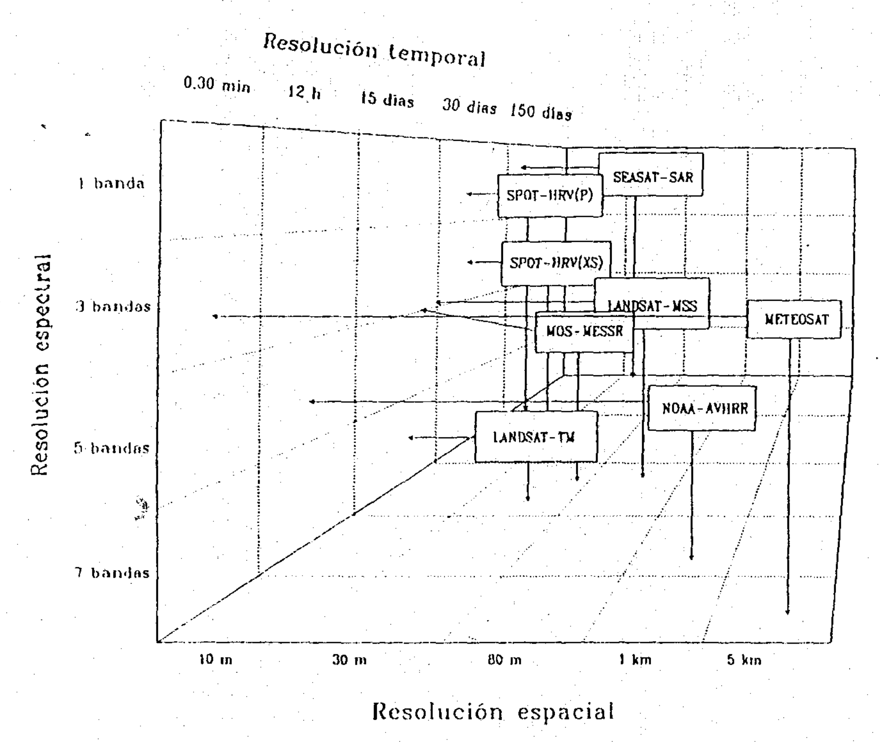


Fig. 3.3 - Relaciones entre resolución espacial, espectral y temporal para distintos sensores

Al mejorar la resolución espacial, espectral y radiométrica con un nuevo sensor, los dos últimos satélites de la serie precisan estar constantemente conectados a red de satélites de comunicaciones (tipo TDRSS), a través de los cuales envían las imágenes a las antenas receptoras.

En consecuencia, a la hora de diseñar un sensor remoto habrá de subrayarse aquel tipo de resolución más conveniente a sus fines. Si está orientado a la detección de fenómenos efímeros en el tiempo, deberá realzarse su cobertura temporal, aun a costa de perder resolución espacial, como ocurre con los satélites meteorológicos. Si, por el contrario, el sensor se orienta a exploración minera, el detalle espacial y espectral resulta más importante, reduciéndose entonces su ciclo temporal.

Estos párrafos pueden contribuir a aclarar un aspecto de la resolución muchas veces malentendido. Con frecuencia se identifica la calidad del

sensor con su resolución espacial. Después de lo que acabamos de decir, parece evidente que se trata de una clara simplificación, puesto que, en determinados estudios, será más vital contar con otros aspectos de la resolución -como sería un ciclo corto de cobertura-, que con un fino detalle espacial. La detección de incendios forestales o la predicción de cosechas son buenos ejemplos de este tipo de estudios. De ahí que sea cada vez más frecuente el uso de satélites meteorológicos para estos fines, ampliando su finalidad original. En la misma línea, algunos trabajos requerirán principalmente una fina resolución espectral; por ejemplo, cuando se trate de discriminar cubiertas con un comportamiento radiométrico muy similar, sólo divergente en bandas muy particulares del espectro. La exploración minera requiere con frecuencia este tipo de sensores, que permiten discriminar fiablemente diferentes litologías o rasgos geobotánicos.

Por último, conviene considerar que una mejora en la resolución espacial no siempre conlleva una mayor exactitud en los resultados de la interpretación. Algunos autores han mostrado la relación entre mejora de la resolución espacial y aumento en la dispersión espectral de los tipos de cobertura. Esa mayor variabilidad supone también un incremento del "solape" espectral entre categorías vecinas y, por tanto, una mayor confusión cuando se pretende separarlas digitalmente (Markham y Townshend, 1981; Toll, 1984; Cushnie, 1987). Más adelante se estudiará este problema en el contexto de la clasificación digital (6.8.1.3). En lo que se refiere a análisis visual, queda fuera de toda duda el interés de mejorar la resolución espacial para facilitar una interpretación más certera (Hopkins et al, 1988).

3.3. SENSORES PASIVOS

Los sensores pasivos se limitan a recoger la energía electro-magnética procedente de las cubiertas terrestres, ya sea ésta reflejada de los rayos solares, ya emitida en virtud de su propia temperatura. De acuerdo a nuestra previa clasificación, puede establecerse una división en estos sensores en función del procedimiento que emplean para recibir la radiación procedente de los objetos. Antes se aludía a los sensores fotográficos, óptico-electrónicos y de antena. En el primer grupo estarían las cámaras fotográficas. En el segundo, los exploradores de barrido y de empuje, y las cámaras de vidicón. Por último, los sensores pasivos de antena se conocen con el nombre de radiómetros de micro-ondas.

3.3.1. Sensores fotográficos

Las cámaras fotográficas todavía siguen siendo el medio más utilizado de teledetección, especialmente desde plataformas aéreas. Basan su funcionamiento en la impresión de un objeto sobre películas fotosensibles, con el apoyo de un sistema óptico que permite controlar las condiciones de exposición. Dentro de esta configuración básica, pueden establecerse numerosas variantes, en función de cuatro elementos: tipo de película, número de objetivos, ángulo de observación y altura de la plataforma.

Respecto al tipo de película, el más empleado en fotografía aérea es el film pancromático (blanco y negro), en el cual se recoge todo el espectro visible sobre una sola emulsión. En la película en color, se mezclan distintas capas foto-químicas, cada una de las cuales es sensible a una banda del espectro visible, por lo que la discriminación de los objetos resulta más atinada. Menos conocidas son los films en infrarrojo, que recogen en tonos de gris la radiación correspondiente al infrarrojo cercano, y en infrarrojo color, también denominado falso color, en donde se desplaza la escala de color natural, situándose entre el verde y el infrarrojo cercano.

En cuanto al número de objetivos, puede tratarse de una cámara mono o multibanda, según albergue una o varias bandas del espectro simultáneamente. En este segundo caso, la observación múltiple puede realizarse con dos modalidades: incorporando varios objetivos -cada uno de ellos con un filtro apropiado- en una sóla cámara, lo que permite impresionar la misma imagen en diversas bandas del espectro; o bien, ensamblando varias cámaras sobre el mismo soporte, cada una de ellas con filtros y films apropiados, con lo que se obtendrían simultáneamente distintas fotografías de la misma zona (fig. 3.4).

En lo que atañe al ángulo de observación, conviene anotar la diferencia entre fotografía vertical, tomada perpendicularmente al terreno (5 grados de desviación permitida), y fotografía oblícua, con un ángulo de visión sensiblemente inferior a 90°. La primera se emplea, con el debido recubrimiento, para la restitución topográfica, así como en estudios temáticos muy variados. La fotografía oblícua tiene principalmente un fin estético, aunque también puede reportar interesantes conclusiones para el estudio del relieve o los asentamientos humanos, entre otras facetas de interés científico.

Por último, la altura de observación permite distinguir entre fotografía aérea y espacial. Desde el punto de vista de su aplicación a

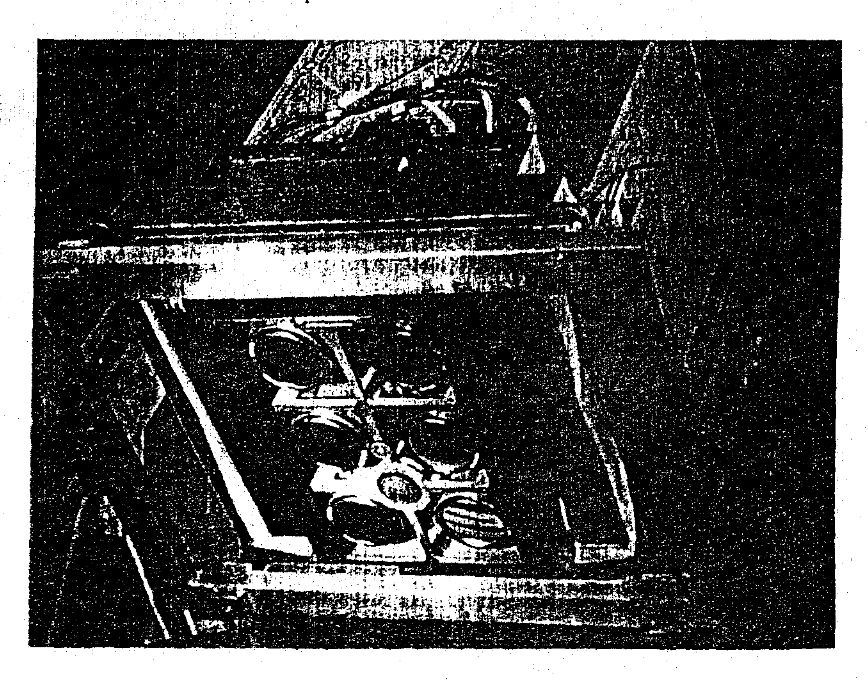


Fig. 3.4 - Cámara Multibanda MKF-6 (cortesía R.Núñez)

estudios de medio ambiente, las diferencias más significativas entre ambas afectan a su resolución espacial, nitidez, cobertura del terreno y precisión geométrica. Las dos primeras son favorables a la fotografía aérea, y las dos últimas a las cámaras espaciales.

De acuerdo al contenido de esta obra, nos centraremos en el análisis de los programas de exploración fotográfica desde plataformas espaciales. Históricamente estas experiencias fueron las pioneras de teledetección desde el espacio. Las primeras fotografías espaciales se obtuvieron durante la misión Mercury-4, a las que siguieron las adquiridas por las cápsulas Gemini y Apollo. En un primer momento estas fotografías se adquieren casi espontáneamente, pero más tarde, y ante la calidad de los resultados, se comenzaron a diseñar proyectos dirigidos específicamente a la observación de los recursos naturales. Este fué el caso de la misión Gemini GT-4 que incluyó el primer experimento programado de teledetección espacial, en este caso para aplicaciones geológicas.

A esta tentativa siguieron otras de gran interés, a bordo de diversas misiones Apollo, que sirvieron para preparar el terreno a otros progra-

mas dedicados exclusivamente a la observación terrestre. En este sentido, conviene destacar el papel del laboratorio espacial tripulado *Skylab*, activo, con diversas tripulaciones, durante 1973. En esta plataforma se incluyó un programa de observación terrestre bautizado como EREP (*Earth Resources Experiment Package*), que incluía diversos sensores: un barredor multi-espectral, dos sensores de micro-ondas y dos sensores fotográficos. Se trataba de la cámara multi-espectral (S 190A), con seis objetivos sensibles a distintas longitudes de onda entre 0,4 y 0,9 μm, y la cámara de observación terrestre (ETC, *Earth Terrain Camera*), dotada de una gran focal (457 mm), que se diseñó para obtener fotografías de alta resolución (15 m) a 435 km de altitud (NASA, 1977). A partir de estas fotografías se han podido abordar estudios temáticos muy variados: usos del suelo, cartografía litológica, vegetación y cultivos (Hart, 1975; Links, 1976, NASA, 1977). Un magnífico ejemplo de fotografía adquirida por esta cámara puede observarse en la figura 3.5.

A consecuencia del éxito de esta experiencia, se concibieron esperanzas de que las cámaras espaciales sirvieran como base para la restitución topográfica -por procedimientos similares a los practicados con fotografía aérea-, remediando así la gran carencia mundial de cartografía básica. Hasta el momento se han diseñado tres cámaras de alta precisión

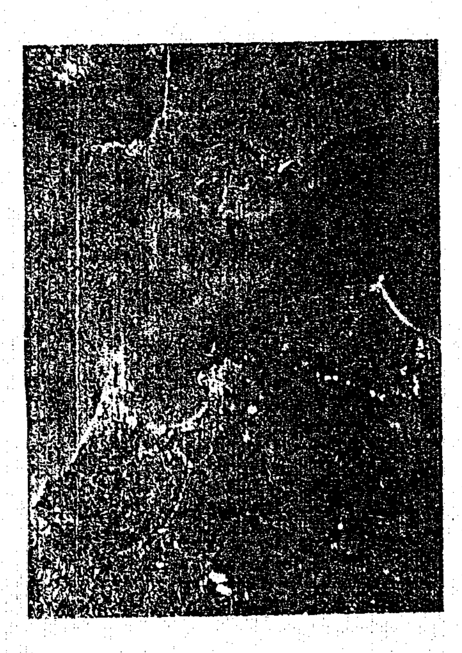


Fig. 3.5 - Fotografía del Skylab sobre el Estrecho de Gibraltar (cortesía R.Núñez)

con fines civiles: la cámara métrica RMK 30/23, la cámara de gran formato (LFC) y la cámara multi-espectral MKF-6.

La cámara métrica RMK 20/23 se diseñó por la casa Zeiss para proporcionar fotografías estereoscópicas de gran precisión y elevada cobertura, con un formato convencional (23 x 23 cm). Fué incluída en la primera misión *Spacelab* de la Agencia Espacial Europea (1983), a bordo del transbordador espacial estadounidense. Esta misión permitió adquirir unas 1.000 fotografías con película pancromática e infrarrojo color sobre varias regiones del mundo, cubriendo una zona aproximada de 11 millones de km² (Konecny, 1986). La longitud focal era de 305 mm, lo que proporcionó una escala aproximada de 1:820.000 a 250 km de altura, con una resolución estimada entre 20 y 30 m. La cobertura estereoscópica se cifró en 60 %, aunque en áreas montañosas se extendió hasta el 80 %. Las restituciones practicadas han permitido obtener cartografía básica a escala 1:100.000 (Schroeder, 1986).

Un ejemplo de este tipo de fotogramas puede analizarse en la figura 3.6. Se trata de un par estereoscópico enmarcado entre los Picos de Urbión y la Sierra de Ayllón, cubriendo un área aproximada de 15.000 km². Aquellos lectores familiarizados con la fotografía aérea, posiblemente queden fascinados al percibir el relieve de una zona tan extensa, contemplada desde 250 km de altura. Junto a los rasgos morfológicos que ofrecen estas fotografías, resulta también de gran interés su visión panorámica, global, de las cubiertas vegetales, sin olvidar su aplicación cartográfica, principal objetivo de esta misión.

El cambio de orientación en las misiones del *Space Shuttle*, tras el desastre del *Discovery*, pone en peligro el empleo futuro de esta cámara, al menos hasta que se concrete el proyecto de estación orbital terrestre.

La misma suerte que la cámara métrica ha corrido la cámara de gran formato (*Large Format Camera*, LFC), diseñada por ITEK con la misma finalidad que la cámara europea. La principal novedad de ésta es su mayor cobertura, gracias a disponer de un formato de 23 x 46 cm. Esta cámara se empleó por vez primera en la misión 41-G del *Space Shuttle* (1984), obteniéndose una variada colección de fotografías con un recubrimiento de hasta el 80 %, lo que facilitó precisiones en altura de 30 m, a una escala 1:50.000 (Togliatti, 1986). La misma cámara ha sido empleada en otras misiones del transbordador espacial norteamericano, tanto con películas pancromáticas como color (Francis y Jones, 1984).



Fig. 3.6 - Par estereoscópico de la cámara métrica RMK 20/23 sobre los Picos de Urbión (cortesía R.Núñez - Inst. Geográfico Nacional)

Un buen ejemplo de la información adquirida por esta sofisticada cámara aparece en la figura 3.7, que abarca unos 47.000 km² en el centro de España (la original comprende unos 62.000 km²). La amplitud de la zona incluida en el fotograma permite percibir una visión global de la región centro, desde el embalse de Santa Teresa (Salamanca) hasta el parque nacional de las Tablas de Daimiel (Ciudad Real). La magnífica resolución espacial que ofrece la cámara LFC se pone aún más en evidencia gracias a la ampliación de esta imagen que ofrece la figura 3.8, situada sobre la ciudad de Madrid y Monte del Pardo. Tras un análisis detallado podrán extraerse rasgos de gran interés sobre la imagen: morfología metropolitana, red viaria, expansión urbana hacia espacios cubiertos por vegetación natural, etc.

Pese a la gran calidad de este documento, la LFC ya no resulta accesible a la comunidad científica, al menos hasta que se cuente con una plataforma espacial tripulada plenamente al servicio de intereses civiles.

La creciente apertura de los países del Este, está brindando la posibilidad de acceder a las imágenes adquiridas por proyectos soviéticos de teledetección. Los más interesantes cuentan con cámaras fotográficas de alta precisión, mejor adaptadas a la cartografía temática que las anteriormente vistas. Una de las más destacadas es la cámara multiespectral MKF-6, instalada a bordo de diversas misiones del satélite Soyuz. Dotada de seis objetivos, permite obtener fotografías sobre seis bandas del espectro, del azul al infrarrojo cercano. Esto supone una información muy valiosa para el estudio de los recursos naturales, hídricos y minerales (Sagdejew et al, 1982). El consorcio Sojuzkarta se encarga, en el momento presente, de la distribución de estos fotogramas, así como de las imágenes adquiridas por otros sensores a bordo de satélites soviéticos (Hyatt, 1988).

3.3.2. Exploradores de barrido

Las características técnicas de los sensores fotográficos impiden que desde ellos se realice una cobertura sistemática de la superficie terrestre, por cuanto no facilitan una transmisión a distancia de las imágenes captadas. Por esta razón se han diseñado otro tipo de sensores, denominados genéricamente óptico-electrónicos, ya que combinan una óptica más o menos similar a la fotografía, con un sistema de detección electrónica, que evita la dependencia de una superficie sólida.



Fig. 3.7 - Fotografía de la Cámara de Gran Formato sobre el Sistema Central y Valle del Tajo



Fig. 3.8 - Ampliación de la fotografía anterior sobre la ciudad de Madrid y alrededores (cortesía R.Núñez - F.Doyle)

Entre estos sensores, los más habituales en teledetección espacial son los exploradores o rastreadores de barrido (*scanners*). Un espejo móvil, que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria, les permite explorar una franja de terreno a ambos lados de la traza del satélite. La radiancia recibida por este componente óptico, se dirige a una serie de detectores, que la amplifican y convierten a una señal eléctrica. Ésta, a su vez, se transforma a un valor numérico, que puede almacenarse a bordo o transmitirse a la red de antenas receptoras (fig. 3.9). La información recibida por éstas se graba en cintas compatibles con ordenador (CCT), para su posterior proceso.

En suma, el sensor convierte una señal analógica, la radiancia recibida, en un valor digital, por lo que no puede hablarse propiamente de fotografías -aunque, en ocasiones, se presenten en formato fotográfico-, sino de imágenes digitales, en razón de su estructura interna. Estos valores numéricos pueden traducirse, de nuevo, en niveles de radiancia, conociendo los coeficientes de calibrado del sensor y las condiciones de adquisición (6.5.2.4). En definitiva, es posible realizar la conversión contraria, digital-analógica, para obtener los valores de radiancia originalmente detectados por el sensor, lo que implica que este tipo de sensores no sólo facilitan una imagen, sino también una medición de la superficie que observan.

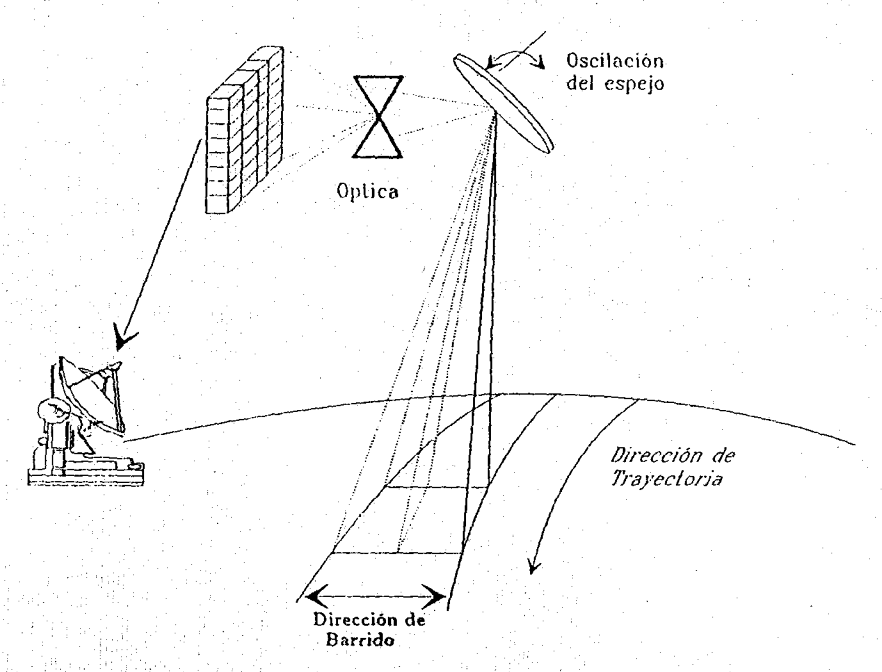


Fig. 3.9 - Diagrama de un explorador de barrido

El número y características de los detectores que incorpora un equipo de barrido es muy importante para explicar las condiciones de la imagen resultante. La señal enviada por el equipo óptico a estos detectores se muestrea a intervalos regulares, de tal forma que únicamente se graba un valor numérico cada cierta distancia. Ese intervalo marca el tamaño de la unidad mínima de información adquirida por el sensor, que se denomina pixel (del inglés, *picture element*). La señal detectada para cada pixel está en íntima relación con el tipo de cubierta observada. Ahora bien, esta señal puede provenir de una superficie homogénea, con una sóla cobertura, o heterogénea, con varias. En el primer caso, el valor del pixel definirá correctamente a dicha cubierta; en el segundo, resultará un promedio de las características espectrales de todas ellas, lo que dificultará su posterior interpretación (3.2.1).

En muchos equipos de exploración por barrido, la señal recibida se descompone a bordo en varias longitudes de onda, cada una de las cuales se envía a un tipo especial de detectores, sensibles a ese tipo de energía. En ese caso, se habla de exploradores de barrido multi-espectral, pues detectan la misma superficie de terreno en distintas bandas del espectro. El número y anchura de esas bandas -lo que hemos denominado resolución espectral- está en función del diseño del propio sensor: del número de detectores con que cuente, de su óptica, capacidad de almacenamiento y transmisión de datos, etc.

Las ventajas más claras de los equipos de barrido multi-espectral, en relación con los sensores fotográficos, pueden sintetizarse en los siguientes puntos:

(i) Permiten ampliar la banda del espectro detectada a longitudes de onda mayores del visible. Las emulsiones fotográficas están limitadas al rango 0,4 a 0,9 μm, visible e infrarrojo reflejado, mientras los equipos de barrido pueden abarcar de 0,4 a 12,6 μm, incluyendo el infrarrojo medio y el térmico.

(ii) Mayor facilidad en la calibración y en la correción radiométrica de los datos.

(iii) Posibilidad de realizar coberturas sistemáticas, y de grandes espacios, gracias a su capacidad de transmitir datos en tiempo real.

(iv) Grabación digital de la información, que asegura su fiabilidad y permite su tratamiento asistido por ordenador.

Lógicamente también poseen algunos inconvenientes respecto a los sistemas fotográficos. Entre ellos, destaca su menor resolución espacial, por más que se estén haciendo grandes progresos en los últimos años, y la exigencia de contar con equipos de tratamiento muy sofisticados para su corrección y tratamiento.

Gracias a las características arriba comentadas, los equipos de barrido **multi**-espectral se han incorporado sistemáticamente a las principales misiones de teledetección desde el espacio. Los más utilizados han sido los incluidos en los programas Landsat (MSS, *Multispectral Scanner*, y TM, *Thematic Mapper*), TIROS-NOAA (AVHRR, *Advanced Very High Resolution Radiometer*), Nimbus (CZCS, *Coastal Zone Color Scanner*), Skylab (S192), y HCMM (HCMR, *Heat Capacity Mapping Radiometer*).

3.3.3. Exploradores de empuje

En los últimos años se ha puesto a punto una nueva tecnología de exploración, denominada 'por empuje' (*pushbroom*). En estos equipos se elimina el espejo oscilante, gracias a disponer de una cadena de detectores que cubre todo el campo de visión del sensor (fig. 3.10). Estos detectores se van escitando con el movimiento orbital del satélite, de ahí el nombre de explorador de empuje, puesto que se explora, en cada momento, una linea completa, desplazándose ésta simultáneamente con la plataforma. Los detectores sólidos que forman un explorador por empuje se denominan dispositivos de acoplamiento por carga (*Charge Couple Devices, CCD)*.

Esta tecnología permite aumentar la resolución espacial del sistema respecto a los barredores convencionales, al eliminar la parte móvil, mientras se reducen algunos problemas geométricos que se producen en los barredores, al perderse la sincronía entre el movimiento del espejo y el de la plataforma. Además no se requiere que los detectores sean interrogados una vez por pixel, como ocurre en los exploradores de barrido, sino sólo una vez por línea, lo que agiliza la detección y emisión de datos.

Como contrapartida, uno de los problemas importantes que atañe a estos nuevos equipos es la difícil calibración de su cadena de detectores. Al aumentar notablemente su número, se precisa de complejos mecanismos de ajuste para que éstos traduzcan, de la misma forma, la señal recibida. Caso contrario, faltaría homogeneidad entre las columnas de la imagen, afectando a su calidad final. Otro problema aún no resuelto en

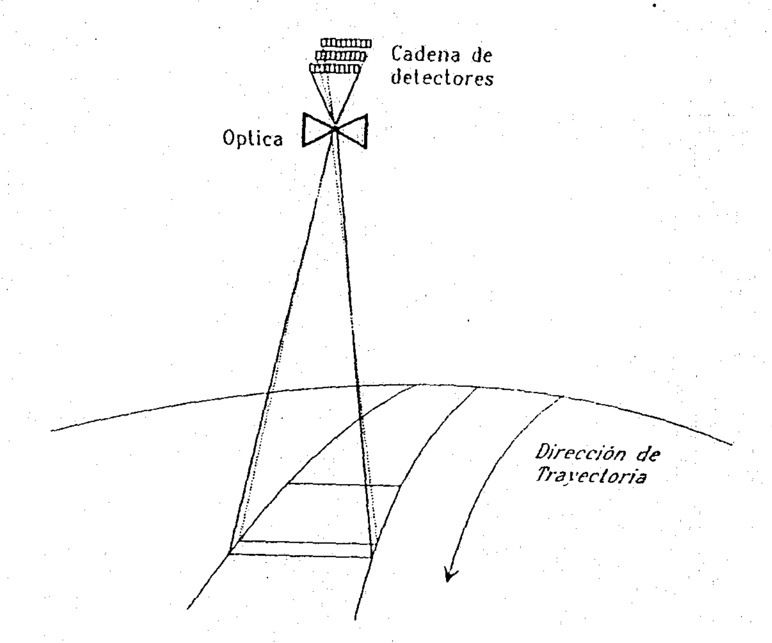


Fig. 3.10 - Diagrama de un explorador por empuje

estos sistemas es ampliar la información espectral que proporcionan, incluyendo al infrarrojo medio y térmico. Hasta el momento presente, se han diseñado equipos mono y multi-espectrales, limitados al espectro visible e infrarrojo reflejado. El trabajo en el térmico resulta mucho más complejo por el tipo de detectores que precisa, muy sensibles al calor y de difícil calibración.

Los exploradores de empuje se han incorporado ya a varios proyectos de teledetección espacial, como es el caso del satélite francés SPOT, del indio IRS-1 y del japonés MOS-1, y es previsible, pese a sus problemas, que alcancen un mayor protagonismo en proyectos futuros de observación de la Tierra.

3.3.4. Tubos de vidicón

Otro de los sistemas pasivos de mayor uso en estudios de recursos naturales es la cámara de vidicón. Se trata de un sistema análogo a la cámara de televisión, que puede trabajar en forma pancromática o multibanda. La imagen es enfocada sobre un foto-conductor, construyéndose una réplica electrónica de la imagen original, que se mantiene en esa

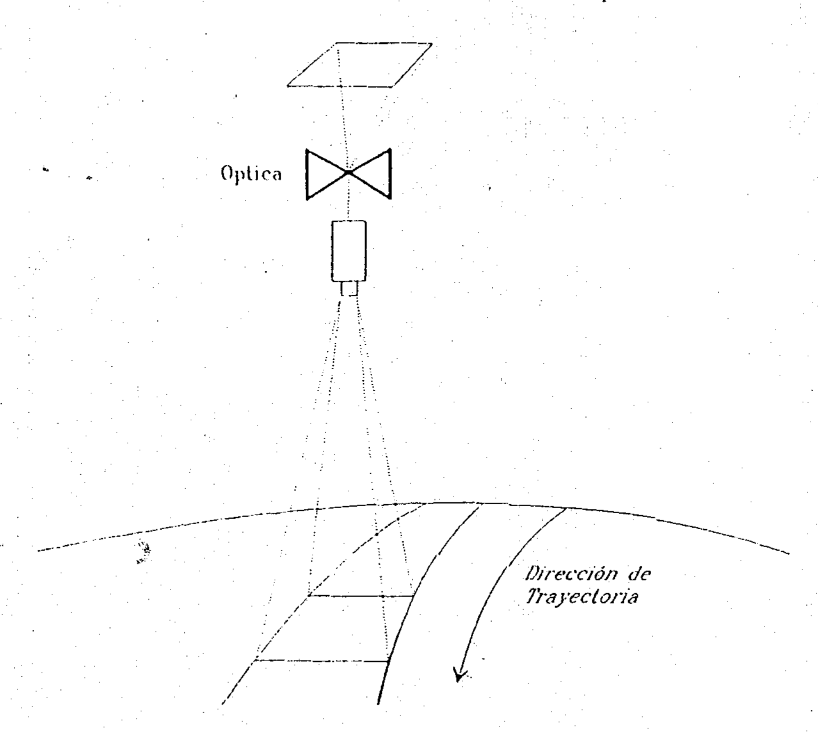


Fig. 3.11 - Diagrama de un sensor de vidicon

superficie hasta que el haz de electrones la barre de nuevo, restaurando así su equilibrio.

Este modelo de funcionamiento se modificó en el caso del RBV (*Return Beam Vidicon*), a bordo de los primeros satélites Landsat. En estos sistemas, la señal de la cámara, se derivaba de la porción no utilizada del haz de electrones, que retornaba a lo largo de la misma trayectoria que el rayo incidente, y era amplificado electrónicamente. Ese mecanismo permitió mejorar la resolución espacial de los equipos de barrido y del vidicón convencional, por lo que fue incluido en algunas misiones espaciales: Apollo, Mariner, TIROS, Nimbus, Bhaskara-1 y 2, así como en los tres primeros satélites de la serie Landsat (fig. 3.11).

3.3.5. Radiómetros de micro-ondas

Como su nombre indica, se trata de un sensor que opera en el rango del espectro correspondiente a longitudes de onda largas, normalmente

entre 1 y 100 mm. Por ello, no está afectado por la situación atmosférica ni por las condiciones de iluminación.

El radiómetro está compuesto por un elemento direccional, un receptor, que permite la recepción y amplificación de las micro-ondas, y un detector. Su gran desventaja estriba en la pobre resolución espacial que proporciona, ya que, al tratarse de un sensor de apertura circular, la resolución es inversamente proporcional al diámetro de apertura y directamente a la longitud de onda. En consecuencia, para poseer una adecuada resolución sería preciso contar con una antena de enormes proporciones. Pese a este problema, los radiómetros de micro-ondas se han utilizado con gran aprovechamiento para diversos estudios medio ambientales. Uno de los campos en donde ha mostrado ese interés atañe a la cartografía de hielo y nieve, gracias a ser muy sensibles a las bajas temperaturas[1]. Esto ha permitido obtener información del estado de la capa de hielo, así como diferenciar tipos de nieve en función de su compacidad y temperatura. A este respecto, el sensor ESMR (*Electrically Scanning Microwave Radiometer*), a bordo del Nimbus-5 y 6, se ha empleado con gran eficacia para detectar movimientos de icebergs y para cartografía de capas de hielo. Un mapa térmico de ambos casquetes polares fue obtenido a partir de estas imágenes en 1977, revelando información de gran interés para el estudio de estas áreas, difícilmente accesibles por otros medios (Hall y Martinec, 1985).

3.4. SENSORES ACTIVOS

3.4.1. Rádar

Característica común de los sistemas activos es su capacidad de emitir un haz energético que, posteriormente, recogen tras su reflexión sobre la superficie que se pretende observar. Entre ellos, el sistema más conocido es el rádar, radiómetro activo de micro-ondas, que trabaja en una banda comprendida entre 0,1 cm y 1 m. Gracias a su flexibilidad -puede trabajar en cualquier condición atmosférica-, el rádar está ganando la atención de la comunidad científicia internacional, especialmente por su aplicación a países ecuatoriales, en donde resulta casi persistente la cobertura de nubes.

[1] Recuérdese que, de acuerdo a la leyes de Planck y Wien [2.4 y 2.6], cuanto mayor sea la temperatura de una superficie, emitirá más intensamente a longitudes de onda más cortas. Por tanto, sólo las cubiertas más frías son perceptibles a estas longitudes de onda.

Las primeras experiencias con rádar se desarrollaron sobre plataformas aéreas. El sistema más utilizado, en este contexto, fue el rádar lateral aero-transportado (SLAR, *Side Looking Airborne Radar*), que mostró gran versatilidad respecto a la fotografía aérea, especialmente para estudios sobre áreas tropicales (Allan, 1983; Trevett, 1986).

El principal problema de estos sensores radica en su baja resolución, como consecuencia del escaso diámetro de la antena. La resolución espacial de un sistema de apertura circular puede calcularse como:

$$R_s = \frac{\lambda h}{\phi} \qquad [3.1]$$

esto es, el tamaño del mínimo objeto identificable sobre la imagen está en relación directa con la longitud de onda λ y la altura de observación (h) e inversa con el diámetro de apertura ϕ. Esto anula el empleo de este sistema en plataformas espaciales, pues para lograr una resolución adecuada sería preciso contar con antenas de enormes proporciones.

Tal inconveniente, no obstante, puede obviarse con el empleo del rádar de apertura sintética (SAR, *Synthetic Aperture Radar*). Su principio de operación se basa en el efecto Doppler, que afecta a la observación realizada cuando existe un movimiento relativo entre objeto y sensor. En el caso del SAR, se registran los pulsos de un mismo punto de la superficie terrestre en dos momentos distintos de la trayectoria, con lo que la resolución es equivalente a la que se obtendría con una antena de similar longitud a la distancia existente entre ambos puntos (Jiménez y García, 1982; Elachi, 1987).

El SAR mostró brillantes resultados en la misión del satélite SEASAT, activo en 1978 para investigación oceanográfica. Estaba dotado de un SAR con polarización semejante HH, con un ángulo de incidencia entre 20 y 26 grados, y 25 m de resolución espacial. Sus principales aplicaciones fueron el estudio del geoide marino (llevaba incorporado un altímetro de micro-ondas, de elevada precisión), así como otras aplicaciones oceanográficas, como estudios de oleaje, detección de bancos de arena sumergidos, corrientes oceánicas, etc. (Elachi, 1982). Pese a la brevedad de su misión -dejó de funcionar a los 99 días de su lanzamiento-, el rango de aplicaciones que ha alimentado es muy amplio: localización de accidentes geológicos (Koopmans, 1983), cartografía de la cobertura del suelo (Deane, 1980), de la vegetación (Parry y Trevett, 1979), y del medio urbano (Henderson, 1983).

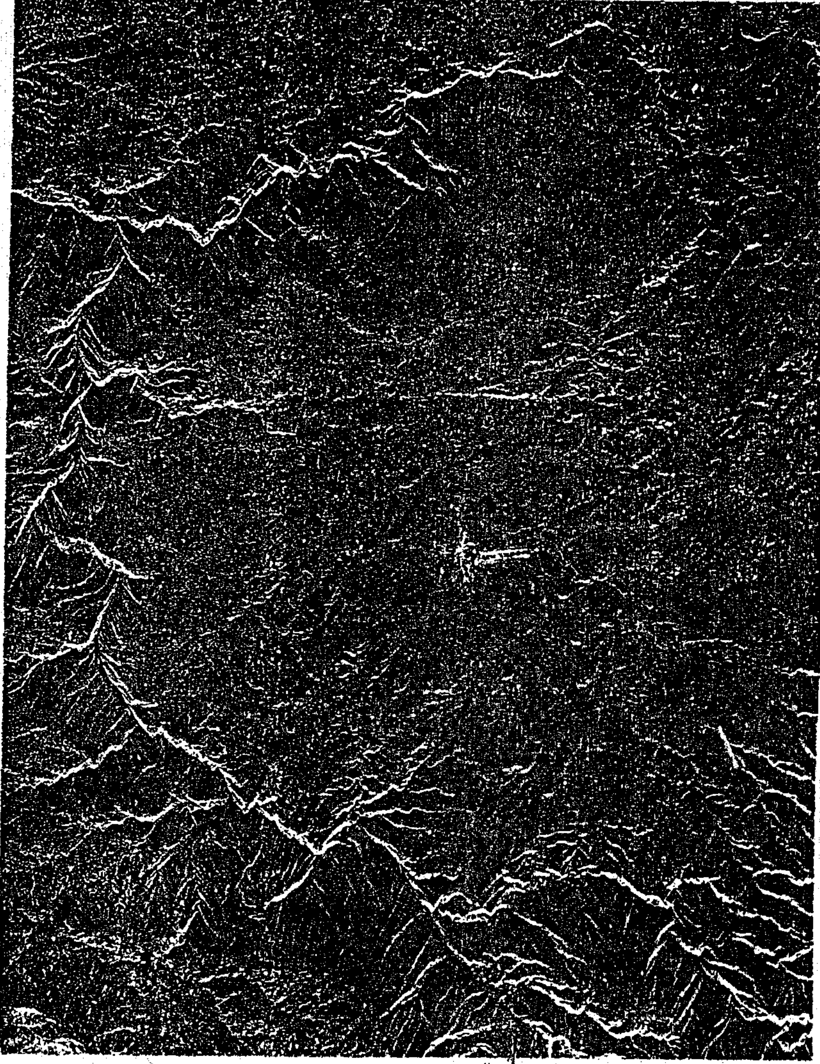


Fig. 3.12 - Imagen Seasat centrada en la ciudad de Monforte de Lemos y cauce del Miño (cortesía R.Núñez)

Un ejemplo de estas imágenes es la presentada en la figura 3.12, adquirida por este satélite en agosto de 1978. Corresponde a la parte meridional de la meseta de Lugo, centrada en la ciudad de Monforte de

Lemos, que aparece en el centro de la imagen con tonos blancos, a consecuencia del alto coeficiente de retro-dispersión de las áreas urbanas (2.7.1). El relieve local resulta muy realzado, especialmente en el cauce de los ríos Miño, Sil y Lor.

La fecunda misión del Seasat se vió ampliada en los años 1981 y 1984 con las misiones SIR-A y B a bordo del *Space Shuttle* (Braun y Rausch, 1986). Las características de estos SAR eran similares al incluido en el SEASAT, aunque ofrecían un mayor ángulo de observación: 47 a 53 grados en el SIR-A y 15 a 60 grados para el SIR-B, gracias, en éste último, a una antena direccionable. Su resolución espacial, no obstante, era la misma, 25 m, así como la polarización (HH) y la banda de observación (L = 23,5 cm). La acción de estos dos SAR ha permitido confirmar las posibilidades de este tipo de sensores para la cartografía temática (Llop et al, 1987). De especial interés ha sido estudiar el efecto del ángulo de incidencia sobre la señal de retorno, que ha permitido mejorar la cartografía de la vegetación y los aspectos morfológicos (Lillesand y Kiefer, 1987, pp. 510-18). La figura 3.13 recoge un ejemplo de la información adquirida por el SIR-A, en este caso sobre el litoral valenciano. Puede apreciarse con nitidez el relieve local: Sierra de Aytana, de Aguilent y la Carrasqueta, así como los principales núcleos urbanos, como Denia o Alcoy.

El creciente interés por las imágenes rádar ha llevado a planificar nuevos proyectos espaciales que incorporen, de forma sistemática, este tipo de información. Éste es el caso del satélite europeo ERS-1, del RADARSAT canadiense y del JERS japonés. Este desarrollo permitirá solventar algunos de los problemas que aún presenta la interpretación de imágenes rádar. Uno de ellos concierne a los sistemas de grabación, todavía no suficientemente perfeccionados para permitir un almacenamiento digital de los datos. Actualmente, las imágenes se graban en película para su interpretación visual, o su conversión posterior a formato numérico (Trevett, 1986).

3.4.2. Lídar

Recientemente se está comprobando el gran interés de otra técnica de teledetección activa. Se trata del Lídar (*Light Detection and Ranging*), que emite pulsos de luz polarizada entre el ultravioleta y el infrarrojo cercano (Kobayashi, 1987; Measures, 1984). En la mayor parte de los sistemas, un láser de pulso se emplea como transmisor y la radiación láser

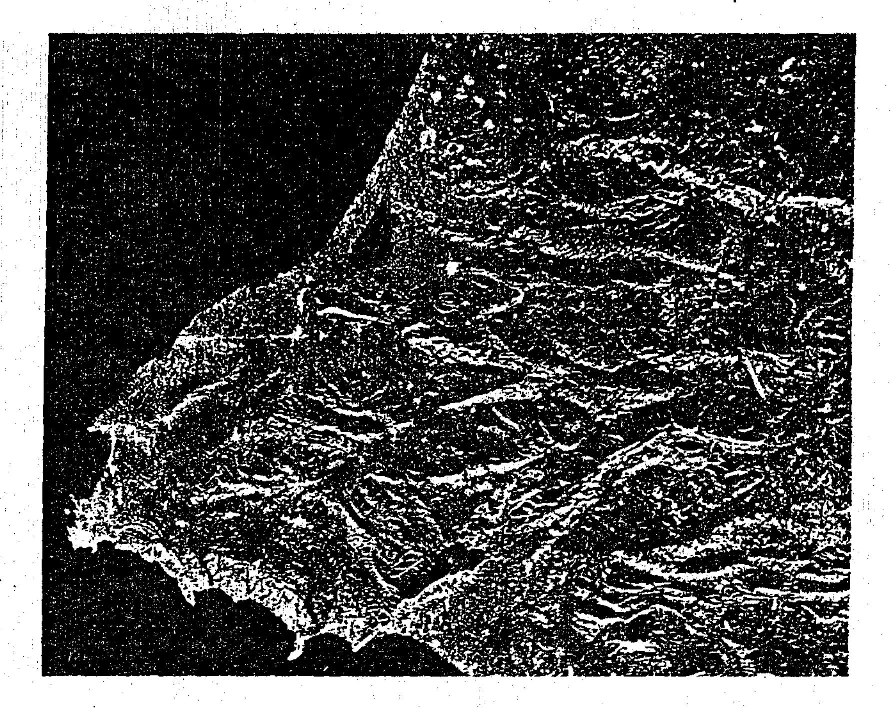


Fig. 3.13 - Imagen SIR-A sobre el litoral alicantino (cortesía R.Núñez)

es colimada y transmitida a la atmósfera. Esta señal interacciona con las partículas atmosféricas, causando su dispersión en función del tipo de elemento encontrado. La energía de retorno se recoge por un telescopio, que a su vez la transmite a través de un filtro óptico a un foto-detector. Esta señal eléctrica es grabada y posteriormente almacenada en un ordenador. En función del tiempo y la intensidad de la señal de retorno, puede deducirse una información muy significativa sobre el tipo de partículas presentes en la zona de estudio.

Existen distintos sistemas Lídar, de acuerdo a los principales tipos de dispersión: de Mie, Rayleigh y Raman, de resonancia, de absorción diferencial, y de fluorescencia inducida (Kobayashi, 1987). Cada uno de estos tipos de Lídar se orientan a aplicaciones específicas. Hasta el momento, los más desarrollados son aquellos que intentan explorar situaciones atmosféricas: detección de aerosoles y partículas contaminantes del aire, medición de la humedad, presión y temperatura del aire, y estimación de la velocidad del viento. Las experiencias desarrolladas

hasta el momento han ofrecido resultados muy interesantes (Huffaker et al, 1984).

En lo que se refiere a la teledetección de cubiertas terrestres, el Lídar más utilizado es el de fluorescencia inducida (Chapelle et al, 1984). Permite detectar manchas de aceite, algas y contaminantes del agua, condiciones de humedad en la vegetación, contenido de pigmentos y cálculos de biomasa. Aunque las experiencias desarrolladas hasta el momento se basan en plataformas aéreas (Hoge et al, 1983; Nelson et al, 1988), este tipo de sensor puede ser una alternativa de interés en proyectos espaciales de baja órbita.

3.5. PLATAFORMAS DE TELEDETECCIÓN ESPACIAL

Concluimos este capítulo repasando brevemente las características de los proyectos más interesantes de teledetección desde el espacio. Bajo la óptica de quien pretende obtener información temática de una imagen, este comentario puede ser útil en la medida en que ofrezca un panorama de la información disponible a partir de plataformas espaciales.

3.5.1. El programa Landsat

Gracias a los brillantes resultados que proporcionaron las primeras fotografías espaciales, la agencia espacial norteamericana diseñó a fines de la década del 60 el primer proyecto dedicado exclusivamente a la observación de los recursos terrestres.

Fruto de estos trabajos fué la puesta en órbita del primer satélite de la serie ERTS (*Earth Resource Technollogy Satellite*) el 23 de julio de 1972. Esta familia de satélites, denominada Landsat a partir del segundo lanzamiento, en 1975, ha constituido, sin duda, el proyecto más fructífero de teledetección espacial desarrollado hasta el momento. La buena resolución de sus sensores, el caracter global y periódico de la observación que realizan y su buena comercialización, explican su profuso empleo por expertos de muy variados campos en todo el mundo. Sólo hasta 1980, la cobertura territorial proporcionada por los diversos satélites de la serie se cifraba en unos 32.000 millones de km², cifrándose en unas 385.000 las imágenes adquiridas por estaciones estado-unidenses, y en 560.000 las recibidas por estaciones foráneas (Brasil,Canadá, China, Italia, Suecia, Irán, Japón, India, Argentina, Sudáfrica y Australia: Colwell, 1983, pp.517-570). Estos datos bastan por sí solos para valorar

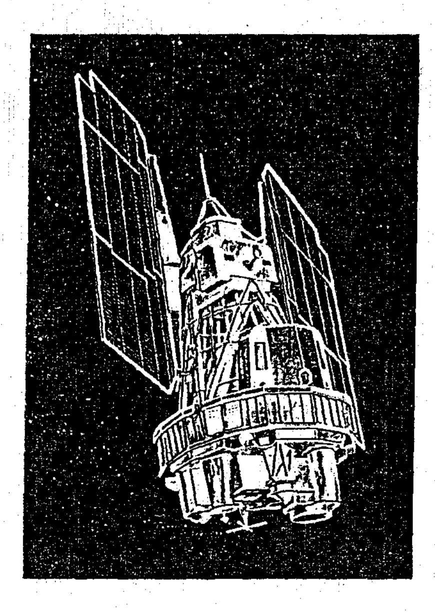


Fig. 3.14 - Configuración de los satélites Landsat-1 a 3

la importancia de este proyecto espacial, y justifican un detallado análisis en el marco de esta obra.

3.5.1.1. *Características orbitales*

Los primeros tres satélites Landsat tenían una forma muy similar a la del Nimbus, en forma de mariposa por la disposición de los paneles solares (fig. 3.14). Sus dimensiones eran de 3 m de altura por 1,5 m de diámetro, que se tornaban en 4 m cuando se extendían dichos paneles. El peso total del sistema se aproximaba a los 960 Kg. Su órbita era heliosíncrona, polar, ligeramente inclinada (99,1 grados). Con una altura orbital media de 917 km, circundaba la tierra cada 103 minutos, con lo que realizaba 14 órbitas diarias para volver sobre la misma porción de la superficie terrestre a los 18 días, y a la misma hora local (entre las 9,30 y las 10,30 a.m. según latitudes). Con el fin de reducir al máximo las alteraciones en las condiciones de observación se dotó a los satélites de un sistema de estabilización según tres ejes, orientados hacia la superficie terrestre y la vertical del punto nadir. Las correcciones en la órbita, por tanto, se hacían desde las estaciones terrestres, lo que confería una gran estabilidad en la toma de datos.

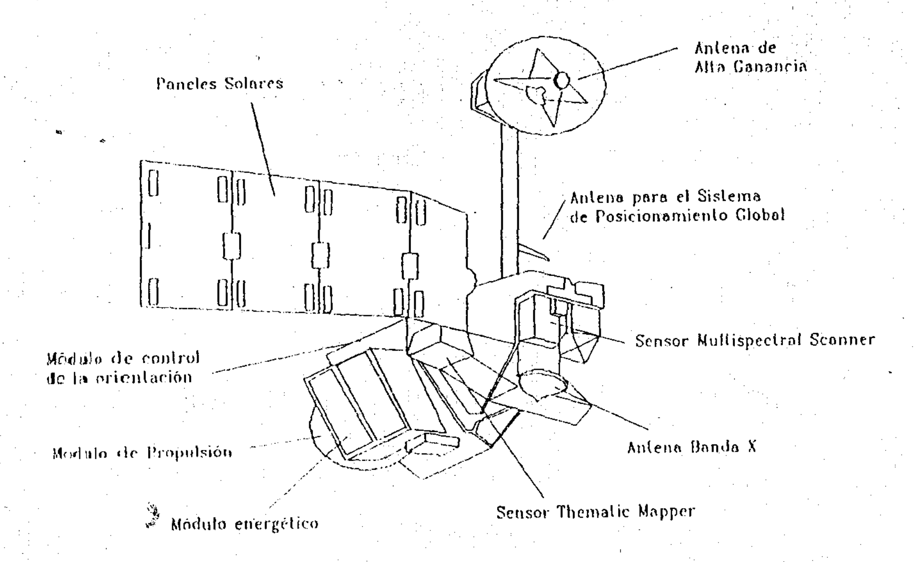


Fig. 3.15 - Configuración de los Landsat-4 y 5

Los dos últimos satélites, el Landsat-4 y 5, modifican su fisonomía (Fig. 3.15) y sus características orbitales. La altura de vuelo se reduce de 917 a 705 km, aunque se mejora el ciclo de recubrimiento, de 18 a 16 días en nuestras latitudes, gracias a un menor período orbital (98,9 minutos). El momento de adquisición, sin embargo, se mantiene en torno a las 9,45 a.m., hora local en nuestras latitudes.

3.5.1.2. Instrumentos de observación

3.5.1.2.1. Sensor MSS

Los primeros Landsat incorporaban un equipo de barrido multi-espectral denominado MSS (*Multispectral Scanner*) y un conjunto de tres cámaras de vidicón (RBV, *Return Beam Vidicon*). Los dos últimos, eliminan las cámaras y las sustituyen por un nuevo explorador de barrido, denominado TM (*Thematic Mapper*) que proporciona mayor resolución espacial y espectral que el previo MSS. Para asegurar la continuidad en la serie de datos, se ha mantenido el MSS en los dos últimos Landsat, con similares características a los anteriores satélites.

En definitiva, el MSS ha sido el sensor más empleado hasta el momento, gracias a la larga serie de imágenes disponibles, desde 1972

hasta la actualidad. El sensor MSS es un equipo de barrido óptico-electrónico, con una configuración muy similar a la comentada más arriba (3.3.2). Su campo total de visión es de 11,56 grados, lo que, a la altura orbital del satélite, le permite explorar una franja de terreno de 185 km, divididos a ambos lados de la vertical de la traza.

Con objeto de acoplar la secuencia de barrido a la velocidad del satélite, el sensor MSS registra seis líneas simultáneamente con cada oscilación del espejo. La radiancia recibida por el sistema focal se transmite a una sistema óptico que la descompone en cuatro bandas, y la envía a distintos detectores. Por tanto, el MSS dispone de 24 detectores (6 líneas x 4 bandas), compuestos por foto-diodos de silicio (banda 7), y por tubos foto-multiplicadores (bandas 4 a 6). En el caso del Landsat-3, se añadió una banda térmica (banda 8), registrada por detectores de mercurio-cadmio-telurio. La cobertura espectral ofrecida por el MSS aparece en la tabla 3.1.

Las señales analógicas que producen los detectores son amplificadas, convertidas a formato digital y grabadas en CCT o enviadas directamente a las estaciones receptoras, desde donde se inicia la distribución de las imágenes. Para el caso de que el satélite no se encontrara bajo la cubierta de alguna antena terrestre, los primeros Landsat incorporaban un sistema de grabación a bordo denominada WBVTR (*Wide Band Video Tape Recorders*), que permitió adquirir imágenes de áreas remotas. En los dos últimos satélites, el flujo de información es tan grande que requieren una red de satélites de comunicación (TDRSS) para enviar a Tierra las imágenes detectadas. Esto ha impulsado aún más el establecimiento de una red de antenas receptoras que hoy cubren prácticamente el conjunto de la superficie terrestre (fig. 3.16). En el caso de España, la antena receptora se encuentra en Fucino, muy próxima a Roma, para el territorio peninsular, y en Maspalomas para la cobertura de las islas Canarias y Africa Occidental.

Una escena adquirida por el sensor MSS comprende 2.340 líneas de barrido y 3.240 columnas por línea. Cada pixel corresponde a una superficie real de 79 m de lado (0,62 Ha), si bien en la transformación digital se le asigna un formato nominal de 57 x 79 m, lo que explica la disimetría final entre el número de líneas y de columnas en la imagen. La radiancia recibida para esa parcela del terreno se transforma a un valor entero, para su almacenamiento en CCT. Ese valor, en los primeros MSS, estaba comprendido entre 0 y 127 para las bandas 4 a 6, y entre 0 y 63 para la banda 7. Los actuales MSS codifican las cuatro bandas entre 0 y 255, la medida estándar en un equipo de tratamiento digital.

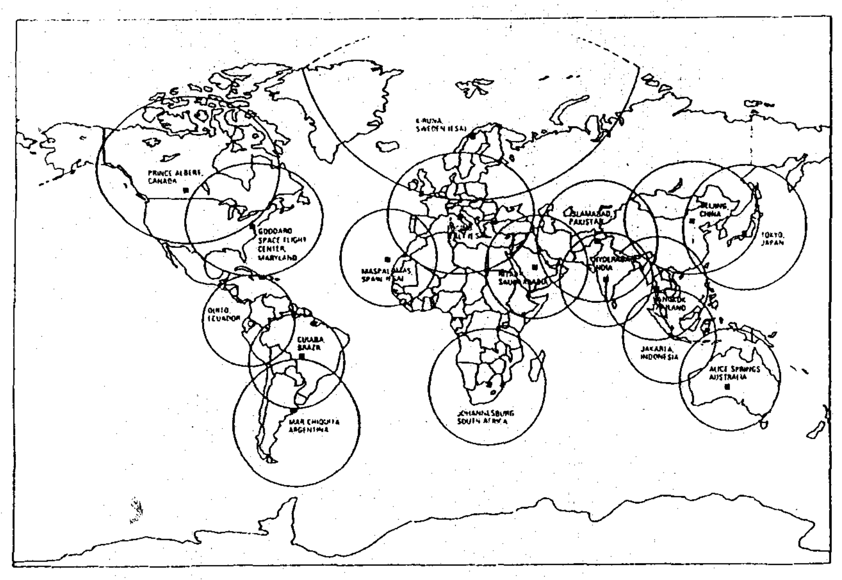


Fig. 3.16 - Antenas receptoras de imágenes Landsat (EOSAT, 1989)

En el diseño del sensor MSS se tuvieron en cuenta las medidas espectrales de laboratorio, de tal forma que las 4 bandas finalmente incluidas pretenden realzar la aplicación de este sensor a la detección de masas vegetales, recursos hídricos y mineros. Las bandas visibles (4 y 5), tienen mejores disposiciones para la detección de aspectos antrópicos, como áreas urbanas o vías de comunicación, a la vez que proporcionan una interesante información sobre la calidad del agua. Las dos bandas en el infrarrojo cercano (6 y 7) pretenden registrar parámetros vitales en la actividad de las plantas, además de ser especialmente sensibles a la humedad.

3.5.1.2.2. Sistema Vidicón

Los dos primeros satélites Landsat incorporaron un sistema de tres cámaras RBV, cada una de las cuales registraba información en una banda espectral comprendida entre el verde y el infrarrojo cercano (tabla 3.1). Su resolución espacial se cifraba en 80 m, cubriendo la misma porción superficial del sensor MSS.

Este sistema no funcionó adecuadamente en los dos primeros Landsat, por lo que fué sustituido en el tercero por otro sistema vidicón. En este

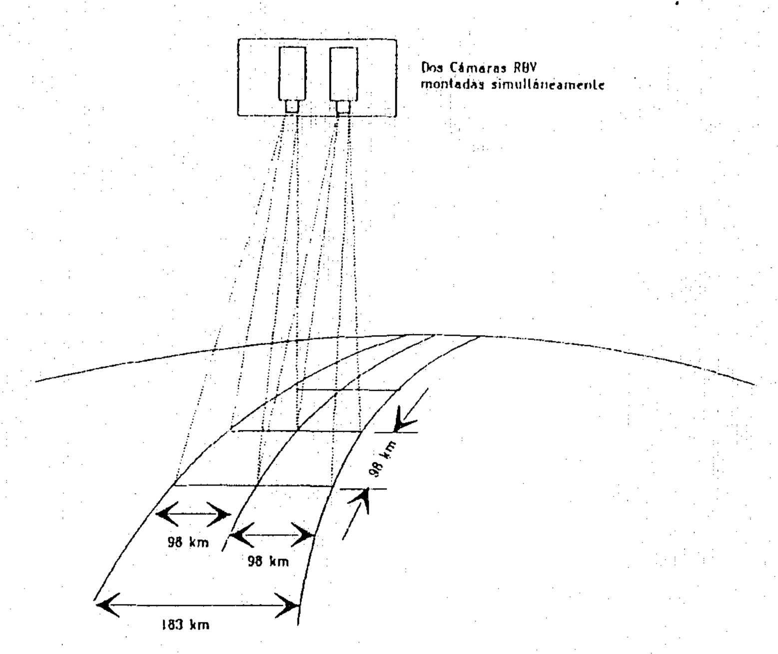


Fig. 3.17 - Diagrama de adquisición del equipo RBV

caso, el planteamiento se dirigió más a mejorar la resolución espacial que la espectral, por lo que se montaron dos cámaras pancromáticas de alta resolución operando simultáneamente con el MSS. Estas cámaras cubrían un abanico espectral de 0,505 a 0,705 μm, proporcionando -en cuatro adquisiciones- la misma cobertura del MSS, pero con una resolución aproximada de 40 m (fig. 3.17). El registro entre ambas permitió utilizar el RBV como auxiliar del MSS, especialmente para mejorar la calidad visual de sus imágenes. Para ello, se emplearon diversas técnicas de fusión, como la normalización de las bandas MSS, a partir de la proporcionada por RBV (Short, 1982), o la transformación HSI (6.6.4).

En el campo de las aplicaciones temáticas, el RBV se ha utilizado en estudios morfológicos (Tricart, 1981) y en cartografía de la cubierta del suelo (King, 1981), si bien la escasa pervivencia de este sensor ha reducido sensiblemente su rango de aplicaciones.

3.5.1.2.3. Sensor *Thematic Mapper* (TM)

Como antes se indicó, el lanzamiento de los dos últimos satélites ha supuesto un notable impulso del programa Landsat. Su principal

aportación consiste en incorporar un nuevo sensor, denominado *Thematic Mapper* (TM), directamente diseñado -como su nombre indica- para la cartografía temática.

Al igual que su predecesor, el MSS, el *Thematic Mapper* es un equipo de barrido multi-espectral, que emplea una técnica muy similar a la descrita previamente. Sin embargo, las novedades que incorpora permiten considerarlo como perteneciente a una nueva generación de sensores. Frente al MSS, el TM aumenta el número de detectores, de 24 a 100, a la vez que se reduce el IFOV, se aumentan los niveles de codificación, y se realiza el barrido en las dos direcciones. Todo ello le permite mejorar la resolución espacial, espectral y radiométrica: de 79 a 30 m, de 4 a 7 bandas, y de 6 a 8 bits. En el TM, cada oscilación del espejo supone 16 líneas de barrido, frente a 6 en el MSS. De esta forma se precisan 16 detectores por banda, salvo la banda térmica que registra una menor resolución (120 m) y sólo requiere cuatro detectores. Este aumento en el número de detectores complica el proceso de calibración, a la par que aumenta el volumen de datos a procesar (6 veces superior al MSS, Hord, 1986). Los detectores están formados por tubos de silicio, para las bandas 1 a 4, indio-antimonio para las bandas 5 y 7, y mercurio-cadmio-telurio para la banda 6.

El incremento de la resolución espacial y espectral que ofrece el TM, facilita una mayor precisión para la cartografía temática, mientras permite ampliar el rango de aplicaciones operativas a partir de sensores espaciales. En este sentido, el diseño del TM pretendió paliar las deficiencias observadas en las imágenes MSS, incorporando información de cuatro bandas del espectro no contempladas en el MSS (azul, dos en el infrarrojo medio y una en el térmico), mientras se sustituían las bandas 6 y 7 de ese sensor -ambas en el infrarrojo cercano- por una sóla, sin perder información sustancial (tabla 3.1)

Con esa nueva configuración, el TM permite una sensible mejora en las aplicaciones terrestres y marinas sobre el sensor MSS: detección de turbideces y contaminantes en el agua (banda azul), exploración minera (infrarrojo medio), contenidos de humedad en las plantas y suelo (infrarrojo medio), detección de focos de calor (infrarrojo medio y térmico), además de mantener las aplicaciones antes señaladas para el sensor MSS.

Tal vez su principal problema radica en su coste y en el volumen de datos que ofrece, de difícil manipulación cuando escasean los recursos informáticos. A modo de referencia, baste indicar que una escena com-

Tabla 3.1
Sensores a bordo del programa Landsat

MSS	RBV	TM(1)
4 (0,5 - 0,6 μm)	1(2) (0,475 - 0,575 μm)	1 (0,45 - 0,52 μm)
5 (0,6 - 0,7 μm)	2(2) (0,580 - 0,680 μm)	2 (0,52 - 0,60 μm)
6 (0,7 - 0,8 μm)	3(2) (0,690 - 0,830 μm)	3 (0,63 - 0,69 μm)
7 (0,8 - 1,1 μm)	1(3) (0,505 - 0,750 μm)	4 (0,76 - 0,90 μm)
8(3) (10,4 - 12,6 μm)		5 (1,55 - 1,75 μm)
		6 (10,40 - 12,50 μm)
		7 (2,08 - 2,35 μm)
Resolución espacial:		
Bandas 4-7: 79 m	1-3(2): 80 m	1-5 y 7: 30 m
Banda 8(3): 240 m	1(3): 40 m	6: 120 m

(1) Sólo en los Landsat-4 y 5
(2) Sólo en los Landsat-1 y 2
(3) Sólo en el Landsat-3

pleta del sensor TM septuplica el coste de una adquirida por el MSS (sobre el mismo territorio), mientras el volumen de datos que incluye alcanza los 231 millones de pixels, frente a los 28 millones de una imagen MSS. Esto ha llevado a comercializar cuartos de escena, bandas aisladas e incluso sub-imágenes de 512 x 512 pixels (EOSAT, 1988), a la vez, que ganan un creciente interés las técnicas numéricas de compactación, como son el análisis de componentes principales (6.7.3) y la compresión de colores (6.6.3).

3.5.1.3. *El futuro del programa Landsat*

La amplitud temática y geográfica de los usuarios del programa Landsat explica el gran interés que existe en la comunidad científica internacional por el futuro de esta familia de satélites. Las nuevas directrices de la Administración norteamericana, a partir del mandato del Presidente Reagan, llevaron en 1984 a transferir al sector privado la comercialización y desarrollo futuro del programa Landsat (OTA, 1984). Pocos meses más tarde, en 1985, la compañía EOSAT recibía los derechos para vender productos Landsat por un período de 10 años, con el

compromiso de participar en el desarrollo de futuros sensores. Por su parte, el gobierno mantenía la responsabilidad en el control físico de la plataforma, mientras que se comprometía a colaborar en el desarrollo de los Landsat-6 y 7. Nuevos recortes presupuestarios pusieron en entredicho este compromiso, hasta el punto de llegar a una situación límite, a inicios de 1989, en el que se temió por la continuidad de los propios Landsat-4 y 5, actualmente en órbita.

Ante las numerosas presiones de la comunidad científica y profesional, el *National Space Council* bajo la presidencia del Vicepresidente Quayle, rectifica el rumbo de los acontecimientos, asegurando una financiación estable para los satélites en funcionamiento y un compromiso para el desarrollo de los futuros Landsat-6 y 7 en la década de los 90. Si este acuerdo se mantiene, la familia Landsat contará con un nuevo miembro en el espacio a inicios de 1991. El Landsat-6 presentará una nueva fisonomía, nuevas condiciones orbitales y sensores a bordo. Aunque siguen los estudios al respecto, parece confirmada la inclusión de un nuevo sensor, denominado *Enhanced Thematic Mapper* (ETM), que ampliará las posibilidades del TM, incorporando una banda pancromática (0,50 - 0,90 μm), con una resolución espacial de 15 m. También se encuentran bajo estudio un sensor oceanográfico (*Sea-WiFS*), y una opción térmica para el ETM, que llevaría a incluir cuatro nuevas bandas en esa región del espectro.

3.5.2. El satélite SPOT

Uno de los proyectos de teledetección espacial más novedoso, frente al estándar marcado por el programa Landsat, ha sido el proyecto SPOT (*Système Probatoire d'Observation de la Terre*), desarrollado por el CNES francés, en colaboración con Bélgica y Suecia. El primer satélite SPOT se lanzó en 1986, mientras el segundo se ha puesto en órbita a inicios de 1990.

Entre las novedades más interesantes de este satélite, se cuenta la incorporación de dos equipos de exploración por empuje denominados HRV (*Haute Resolution Visible*). Estos dos sensores permiten obtener imágenes en dos modalidades: pancromático y multibanda (verde, rojo e infrarrojo cercano), con una resolución espacial de 10 y 20 m, respectivamente (tabla 3.2). El área cubierta en cada escena es de 60 km de lado, por lo que estos sensores necesitan incorporar 3.000 detectores en modo multi-espectral y 6.000 en modo pancromático. La resolución radiométrica por pixel se cifra en 8 bits en multibanda y 6 en pancromático.

Tabla 3.2
Características del sensor HRV - SPOT

Banda	Amplitud	Resolución
XS1	0,50 - 0,59 μm	20 metros
XS2	0,61 - 0,68 μm	20 metros
XS3	0,79 - 0,89 μm	20 metros
P	0,51 - 0,73 μm	10 metros

Otra importante novedad del satélite SPOT es su capacidad para variar el ángulo de observación, gracias a un dispositivo móvil instalado en el equipo óptico. Esto le permite observar la misma zona en órbitas sucesivas, reduciendo la frecuencia temporal de las imágenes (de 26 días a 2-3 días según las latitudes). Esa misma aptitud, permite al SPOT adquirir imágenes estereoscópicas, lo que añade a su potencial temático una clara capacidad topográfica (fig. 3.18). En definitiva, la flexibilidad del sistema le facilita adaptar su órbita a las necesidades del usuario (Chevrel et al, 1981; Brachet, 1986).

La mejora en resolución espacial frente al sensor TM hace a las imágenes SPOT idóneas para tareas de análisis visual (fig. 3.19*), especialmente en el medio urbano. Asimismo se han desarrollado técnicas para combinar el canal pancromático de SPOT con imágenes TM (6.6.4), de tal forma que se aproveche la resolución espectral de este último, recogiendo de alguna forma la resolución espacial del primero.

En lo que se refiere a clasificaciones temáticas a partir de estas imágenes, aún no ha quedado patente su superioridad frente a las imágenes TM. En otras palabras, todavía no se ha evaluado con rigor qué supone la mejora en resolución espacial frente a la pérdida en espectral para identificar tipos de cubierta. No obstante, la práctica de la comunidad científica parece mantener su confianza en el sensor TM, por cuanto la dimensión espectral es básica en determinados estudios medio ambientales.

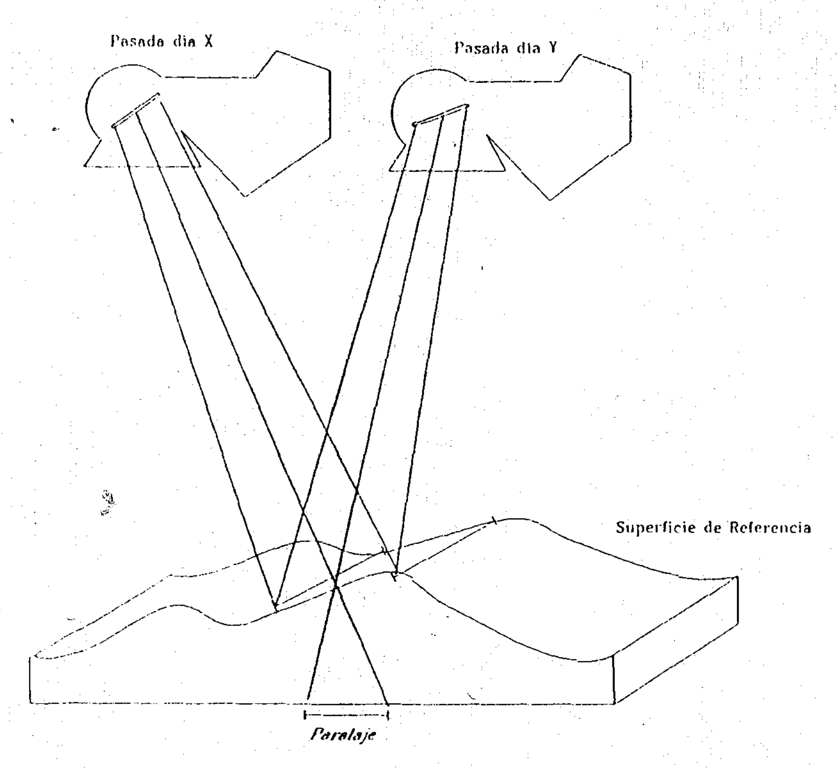


Fig. 3.19 - Sistema de adquisición de imágenes estereoscópicas que realiza el satélite SPOT

3.5.3. Tiros-NOAA

Esta familia de satélites, constituye uno de los múltiples programas diseñados para enviar información meteorológica a la superficie terrestre. Los satélites meteorológicos, los únicos que pueden calificarse como plenamente operativos hasta el momento presente, se desarrollaron a partir de 1960 con el lanzamiento del satélite TIROS-1. Continuación de esta serie es la denominada NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration Satellite*), nombrada así a partir del sexto satélite que se lanzó en 1979.

Teniendo en cuenta que el principal objetivo de este programa es facilitar información sobre el estado presente de la atmósfera, el satélite NOAA se diseñó para ofrecer un ciclo de cobertura muy corto: una ima-

Tabla 3.3
Características del sensor AVHRR-NOAA

Banda	Amplitud (μm)	Región Espectral
1	0,58 - 0,68	Rojo
2	0,72 - 1,10	Infr. cercano
3	3,55 - 3,93	Infr. medio
4	10,30 - 11,30	Infr. térmico
5	11,50 - 12,50	Infr. térmico

gen cada doce horas, en nuestras latitudes. Este ciclo se mejora a seis horas gracias a la sincronización entre los dos satélites que operan simultáneamente. Su altura orbital es de 833 a 870 km, cubriendo en una imagen un área aproximada de 3.000 km de lado. La cadencia temporal complementa la información adquirida por los satélites geo-estacionarios, pues ofrece imágenes cada 12 horas, en los momentos de máxima y mínima insolación.

El sensor más interesante, para nuestros objetivos, se denomina AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), diseñado para proporcionar imágenes con una resolución de 1,1 km (en el nadir), en 5 bandas del espectro (tabla 3.3). Gracias a su buena cobertura temporal y bajo coste, el sensor AVHRR ha ganado un creciente interés para abordar estudios medio ambientales de pequeña escala. Su amplia cobertura y baja resolución le permiten analizar las condiciones de la vegetación en períodos cortos de tiempo y a escala global, lo que le hace idóneo para estudiar fenómenos muy dinámicos como la desertificación (Tarpley et al, 1984), la deforestación de zonas inaccesibles (Tucker et al, 1984), o los incendios forestales de gran magnitud (Matson y Holben, 1987; Flannigan y Vonder Haar, 1986). Asimismo, se está empleando en estudios globales de vegetación y cubierta del suelo a escala continental (Tucker et al, 1985; Townshend et al, 1987; Goward et al, 1987; Lloyd, 1989; Goward, 1989). En estos trabajos sobre grandes áreas suele emplearse un formato AVHRR de baja resolución, denominado GAC (*Global Area Coverage*), que reduce el tamaño del pixel a 4 km, frente al original de 1,1 km denominado LAC (*Local Area Coverage*).

Un magnífico ejemplo de imagen AVHRR-NOAA se incluye en la figura 3.20*. Corresponde a la práctica totalidad del continente europeo. En lo que a nuestro país afecta, resulta muy expresivo la diferencia de tonalidad frente a los países del centro y norte de Europa, así como el

contraste entre el Norte y el Sur de la península, sólo interrumpida por la cubierta forestal de nuestras principales alineaciones montañosas.

3.5.4. Satélites geo-estacionarios

Este nombre indica un grupo de satélites diseñados para observar permanentemente la misma porción de la superficie terrestre. Este propósito se consigue gracias a situarse en una órbita de gran altitud (36.000 km), que les permite sincronizarse con el movimiento terrestre.

Los satélites geo-estacionarios sirven a la observación meteorológica, formando una red que cubre el globo terrestre. Esta red, de la que forman parte satélites norteamericanos, europeos y japoneses, se coordina por la organización meteorológica mundial, a través de su programa *GARP Global Experiment.*

El primer satélite geo-estacionario se lanzó en 1966 por la NASA, denominándose ATS (*Applications Technollogy Satellite*). En forma operacional, este satélite se convirtió en la serie SMS, bautizada como GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) a partir de 1975. En el momento presente, se cuenta con tres satélites de esta familia, que cubren el conjunto del territorio norteamericano, así como el Atlántico norte. El satélite incluye un sensor de barrido, denominado VISSR, que registra el disco visible de la Tierra cada 30 minutos, ofreciendo imágenes en el espectro visible e infrarrojo térmico.

Similar configuración tiene el satélite europeo Meteosat, lanzado por vez primera en 1977, y reemplazado por el Meteosat-2 en 1981. Este satélite cuenta con un sensor de barrido, que ofrece información sobre tres bandas del espectro: 0,4 a 1,1 μm, 5,7 a 7,1 μm y 10,5 a 12,5 μm. La primera es bien conocida por su aparición en los medios de comunicación. La segunda, se emplea para estudiar el contenido de vapor de agua en la atmósfera, mientras la tercera (térmica) se dirige a la discriminación de tipos de nubes y temperaturas de superficie. La resolución espacial que ofrece es de 2,5 a 5 km, apta para la observación de grandes espacios. La imagen completa del Meteosat cubre el disco visible de la Tierra, desde su posición a 0° de latitud y longitud (fig. 3.21*). Está prevista la continuación de esta serie con dos satélites de inminente operatividad.

La red de observación terrestre se completa con el satélite japonés GMS, el indio Insat, y el soviético GOMS. Todos ellos tienen similares características a las arriba enunciadas, y sirven eficazmente a la predicción de fenómenos catastróficos como huracanes o gotas frías. En conjunción con otras plataformas heliosíncronas (como NOAA o Nimbus), la meteorología desde satélites se destaca actualmente como la principal aplicación operativa de la teledetección espacial (Barret, 1974).

3.5.5. Otros proyectos de observación terrestre

Los últimos años están asistiendo a un acelerado desarrollo de proyectos de observación terrestre. Entre aquellos que ya son una fecunda realidad, cabe destacar por su interés para estudios medio ambientales, el satélite japonés MOS-1, y el indio IRS-1.

El primero de ellos, el MOS-1 (*Marine Observation Satellite*), fué lanzado en febrero de 1987, y se ha diseñado primariamente para la investigación oceánica. Su carga útil se compone de los siguientes sensores: un equipo de exploración por empuje, bautizado como MESSR (*Multispectral Electronic Self-Scanning Radiometer*), con una resolución de 50 m y cuatro bandas espectrales, dos en el visible y dos en el infrarrojo cercano; un explorador de barrido, denominado VTIR (*Visible and Thermal Infrared Radiometer*), con una banda en el visible y tres en el infrarrojo térmico (resolución espacial de 900 y 2.700 m, respectivamente); y un radiómetro de micro-ondas, el MSR (*Microwave Scanning Radiometer*), operando a 23 y 31 GHz, con resolución de 32 y 23 km, respectivamente (Tsuchiya et al, 1987).

De estos sensores, el más destacado para estudios medio ambientales es el MESSR, similar al HRV-SPOT en cuanto a tecnología, al MSS en cuanto a resolución espectral, y a medio camino entre éste y el TM respecto a su resolución espacial. Este sensor ofrece imágenes de 100 x 90 km, con un ciclo de recubrimiento de 17 días. Si bien, en el momento de redactar esta obra, no contamos con experiencia directa en el tratamiento de estas imágenes, no cabe duda que pueden ser una valiosa alternativa para numerosos estudios, tanto por la calidad del sensor, como por el coste de las imágenes, sensiblemente inferior a las del sensor TM o SPOT. La agencia espacial japonesa (NASDA), comercializa estas imágenes en nuestro territorio a través de la red europea EARTHNET, contando con estaciones receptoras en Maspalomas y Tromsö.

En cuanto al satélite IRS-1A (*Indian Remote Sensing Satellite*), fue lanzado el 17 de marzo de 1988, con el objetivo directo de mejorar el conocimiento de los recursos naturales de ese gran país asiático. Es

Tabla 3.4
Características del sensor LISS

Banda	Amplitud (μm)	Banda Espectral
1	(0,45 - 0,52 μm)	Azul
2	(0,52 - 0,59 μm)	Verde
3	(0,62 - 0,68 μm)	Rojo
4	(0,77 - 0,86 μm)	Infrarrojo cercano

sucesor de dos proyectos previos de la agencia espacial india: los Bhaskara I y II, dotados de sistemas vidicón. En el caso del IRS-1A se opta por la tecnología de exploración por barrido, con dos sensores denominados LISS (*Linear Imaging Self Scanning*) con una resolución de 72,5 m (LISS-I, una cámara) y 36,25 m (LISS-II, dos cámaras). La superficie cubierta en cada escena es de 148 km para el LISS-I, y de 74 km para el LISS-II, con un ciclo de repetición de 22 días. El sensor LISS facilita información sobre cuatro bandas del espectro, comprendidas entre el azul y el infrarrojo próximo (tabla 3.4), por lo que resulta idóneo para estudios costeros, discriminación de cubiertas vegetales y exploración minera. Actualmente, la agencia india NRSA (*National Remote Sensing Agency*) sólo dispone de una estación receptora, situada en Hyderabad, por lo que no es posible obtener imágenes LISS de nuestro país. Pese a ello, las primeras imágenes de este sensor parecen demostrar la calidad del proyecto (fig. 3.22*)

En cuanto a proyectos futuros, el más destacado en nuestro contexto es el programa ERS-1, primer satélite de observación terrestre desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA). El satélite ERS (*European Remote Sensing Satellite*), previsto para lanzamiento en 1990, incorporará un rádar de apertura sintética (SAR), trabajando en la banda C (5,3 GHz), y con una resolución espacial de 30 m. Asimismo, se incluyen en la plataforma un difusómetro, para medir la velocidad del viento, y un altímetro de micro-ondas, ideado para obtener una precisión de ± 50 cm. El satélite ERS se dirige principalmente a estudios oceanográficos (altitud del oleaje, dirección y velocidad del viento, bancos de hielo, recursos pesqueros), aunque también puede ser de gran utilidad para el seguimiento de áreas continentales con frecuente cobertura nubosa (Hervás, 1987).

4. BASES PARA LA INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES EN TELEDETECCIÓN ESPACIAL.

A partir de este capítulo, se desarrolla el núcleo central de este libro. Como ya señalábamos en la introducción, el objeto de esta obra es facilitar, a todos los interesados en el estudio del medio ambiente, el acceso a una técnica que puede serles fructífera en la comprensión de los fenómenos que estudian. Por tanto, se ha puesto más el énfasis en la interpretación que en la obtención de las imágenes espaciales. Los capítulos previos se dirigen precisamente a facilitar esa interpretación, de tal forma que cada uno pueda aplicar las imágenes espaciales a su propio ámbito de interés.

En este apartado se presentan algunas ideas introductorias, útiles en el momento de proyectar una aplicación temática a partir de los datos suministrados por sensores espaciales. Parece lógico que, antes de abordar la interpretación propiamente dicha, se consideren una serie de cuestiones fundamentales. Por ejemplo: ¿en qué banda del espectro puede ser detectado el fenómeno de interés?, ¿cuál es la resolución espacial requerida para observarlo?, ¿qué ciclo temporal precisa?, ¿en qué plazo han de entregarse los resultados?, ¿a qué escala?, ¿con qué nivel de detalle?, ¿qué método de análisis (visual o digital) garantiza esos requerimientos?, etc.

La respuesta a estas cuestiones se relaciona con diversos factores, si bien, entre ellos, cabe destacar dos fundamentales: (i) los objetivos del proyecto, y (ii) los medios disponibles para su realización. Lógicamente, los objetivos del trabajo orientan la mayor parte de las decisiones consiguientes, como son las relativas al tipo de información necesaria, a su precisión, escala y nivel de desagregación. Por su parte, los medios disponibles implican un equilibrio entre lo deseable y lo posible, restringiendo el método más idóneo para abordar los objetivos marcados, ya sea en lo que se refiere a las imágenes disponibles para el análisis, ya a los medios para su interpretación (fig. 4.1).

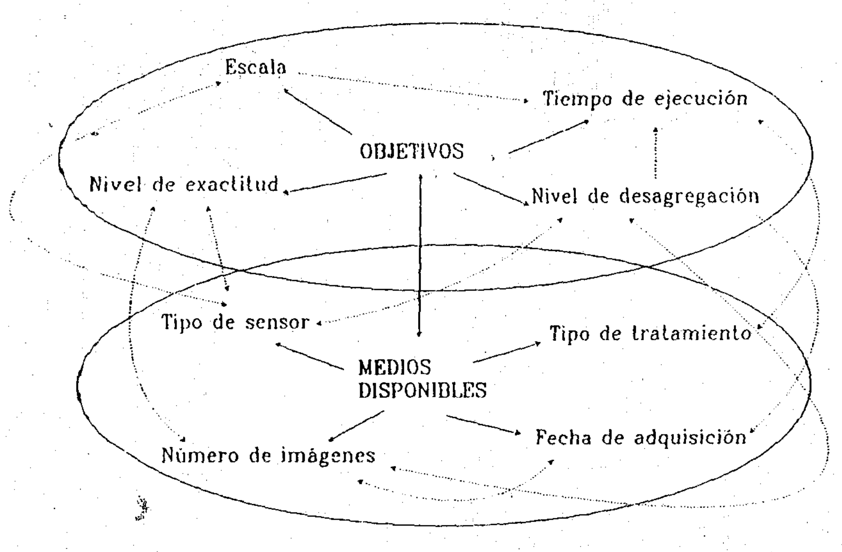


Fig. 4.1 - Bases para la interpretación de imágenes en trabajos de teledetección

4.1. FIJACIÓN DE OBJETIVOS: ESCALA Y LEYENDA DE TRABAJO

Cualquier usuario novicio de la teledetección debería tener presente que es una técnica con limitaciones, válida para resolver un determinado número de problemas. No es, como se ha concebido en algunos ambientes, una panacea que solucione todas las necesidades de información sobre el medio ambiente que requiere el hombre de hoy. Falsas expectativas pueden conducir a falsas conclusiones, arribando al polo opuesto; esto es, a concebir la teledetección espacial como una técnica más vistosa que eficaz. Para evitar uno y otro extremo, cualquier proyecto de aplicación debería comenzar cuestionándose si esta técnica puede solventar el objetivo marcado, y si la información que ésta ofrece no es obtenible por otros medios más rápidos o económicos.

La respuesta no siempre es sencilla. El rango de aplicaciones de la teledetección está en constante crecimiento, gracias a las innovaciones en los equipos sensores y en los métodos de tratamiento. Sin embargo, parece lógico que un trabajo de aplicación se base sobre un soporte previo, en donde diversos proyectos de investigación hayan demostrado la validez de una determinada metodología. A este respecto, existe ya un buen grupo de estudios en donde la teledetección espacial está reconocida como una fuente primaria de información, como son la cartografía de la

cobertura del suelo, estadística agraria, exploración minera, temperatura y composición del agua, inventario forestal y predicción meteorológica, entre otras. Otra serie de aplicaciones se encuentran aún en fase de experimentación, como es el caso de la estimación de biomasa, inventario del volumen de nieve, detección de contaminantes o cálculos demográficos. Por último, otros proyectos parecen aún inviables a partir de esta técnica, ya por el nivel de precisión que exigen (inventario ganadero o de animales silvestres), ya por falta de la cobertura temporal o espectral debida (detección de aerosoles y partículas contaminantes o pérdidas energéticas en núcleos urbanos). En cualquier caso, una inspección a la amplia bibliografía disponible evitará concebir esperanzas irreales y realizar gastos innecesarios (fig. 4.2).

Supuesto que el campo de interés sea abordable a partir de sensores espaciales, deben definirse una serie de aspectos para explicitar el tipo de información y de tratamiento que se aplicará en el estudio. Con este propósito, conviene considerar principalmente la escala y nivel de desagregación requerida para el trabajo.

Ambos aspectos están íntimamente relacionados. La escala del trabajo condiciona la unidad mínima de información que se debe incluir en el mapa, que suele denominarse *mínima unidad cartografiable* (*MIC*). Varios autores recomiendan que la MIC no sea inferior a 4 mm², medidos a escala del mapa (Anderson et al, 1976; Campbell, 1987). De ahí que la escala de trabajo se conecte directamente con el tipo de sensor más idóneo para abordar el mismo. No tendría sentido realizar una cartografía a escala 1:50.000 utilizando el sensor AVHRR del NOAA, pues la MIC sería de aproximadamente 2 x 2 cm (1 km² a esa escala). De igual forma, no sería muy razonable abordar un estudio de pequeña escala (p.ej, 1:1.000.000) a partir del sensor Landsat-TM, pues habrían de generalizarse notablemente los resultados para llegar a la MIC. De acuerdo con la Asociación Cartográfica Internacional (López-Vizoso, 1989), las escalas límite más idóneas para distintos sensores son:

NOAA - AVHRR,	1:2.000.000
Landsat - MSS,	1:200.000
Landsat - TM,	1:100.000
Spot - HRV (Pan),	1:50.000

Junto a ello, la escala condiciona el número y desagregación de las categorías a discriminar. Obviamente, una cartografía a escala 1:50.000 no puede incluir el mismo número de clases que otra a escala menor: la necesaria generalización de líneas en mapas de pequeña escala, exige también una generalización de las categorías cartografiadas.

CARTOGRAFIA DE LA CUBIERTA DEL SUELO
OCUPACION HUMANA
VEGETACION
CULTIVOS

CARTOGRAFIA GEOLOGICA
LITOLOGIA
LINEAMIENTOS
PROSPECCION

NIEVE-HIELO
SEGUIMIENTO ICEBERGS
CARTOGRAFIA NIEVE
DINAMICA GLACIAL

MASAS DE AGUA
EMBALSES
CORRIENTES MARINAS

INVENTARIO ESTADISTICO
PREDICCION DE COSECHAS
INVENTARIO DE CULTIVOS

Fig. 4.2 - Aplicaciones más importantes de la teledetección espacial

Ahora bien, la leyenda no sólo está en función de la escala, sino también de la complejidad del territorio. Como consecuencia, ha sido práctica habitual en la cartografía de ocupación del suelo emplear una leyenda particular para cada zona de estudio, bien adaptada a las necesidades locales, pero con escasa validez para otros ámbitos. Por ejemplo, sobre una muestra de 28 trabajos extraídos de las referencias citadas al final de esta obra, ninguno presenta criterios comunes para el establecimiento de la leyenda de cobertura del suelo. Las clases más repetidas son agua -la más fácil de discriminar a partir de sensores espaciales-, área urbanizada, cultivada y forestal, aunque en estas últimas se realizan múltiples divisiones, según los objetivos específicos del inventario (Chuvieco, 1985a). Esta falta de criterios comunes dificulta la generalización de resultados a otros espacios, e invalida cualquier intento de cartografía sistemática del territorio.

Para subsanar estos problemas, el *U.S. Geological Survey* diseñó, a lo largo de los años setenta, diversos esquemas de clasificación para su cartografía de ocupación/uso del suelo (Anderson, 1971; Kleckner, 1982). El esquema más conocido se desarrolló en 1976, y está específicamente diseñado para el empleo de sensores remotos (Anderson et al, 1976). Se trata de una leyenda de uso y ocupación del suelo organizada en cuatro niveles jerárquicos, cada uno de los cuales se pretende obtener a partir de diversos medios de teledetección: imágenes de satélite para el nivel

más general, y fotografía aérea de gran escala, en combinación con el trabajo de campo, para las clases más detalladas. Asimismo, esta clasificación es flexible, se puede aplicar a espacios muy contrastados, y garantiza la integración entre campos afines de inventario medio ambiental. El principal problema que presenta, a nuestro juicio, es la inclusión en el mismo esquema de clases de uso y de ocupación del suelo[1], lo que origina algunas confusiones conceptuales. Por ejemplo, varias categorías podrían clasificarse en dos o más equipos de acuerdo a su consideración como uso u ocupación: canteras (uso) y roquedo desnudo (ocupación), o dehesa (uso) y prados arbolados (ocupación). Como es lógico, los sistemas de teledetección sólo permiten realizar cartografía de la ocupación del suelo, ya que la señal detectada por el sensor corresponde a los materiales que aparecen en la superficie terrestre, y no al uso al que se destinan.

Pese a este problema, el trabajo de Anderson y colaboradores ha sido enormemente fructífero, y ocasión de otros intentos similares. Este es el caso de la leyenda diseñada para el programa *CORINE-Land Cover* (tabla 4.1). Se trata de un proyecto de la Comisión de las Comunidades Europeas, que pretende inventariar la ocupación del suelo de Europa a escala 1:100.000 a partir de imágenes espaciales.



La decisión sobre la leyenda de trabajo condiciona otros aspectos de la interpretación, como es el tipo de tratamiento o el número y fecha más conveniente de las imágenes a interpretar. Si se incluyen subdivisiones en categorías urbanas, el tratamiento digital resulta poco certero, siendo más apropiada la interpretación visual. De igual forma, bastaría una imagen estival para discriminar los cultivos de regadío, pero si se pretende distinguir entre ellos puede ser necesario adquirir imágenes adicionales, en donde éstos pueden diferenciarse más nítidamente. En cualquier caso, el nivel detalle que ofrece la leyenda se relaciona estrechamente con el riesgo de error, por cuanto es altamente probable que cualquier subdivisión implique separar categorías muy similares espectralmente (7.1.2). Caso de que esa ulterior división no sea abordable a partir de las imágenes o del método de interpretación propuesto, deberá el usuario ajustar alguno de los dos parámetros: bien hacia una leyenda más generalista, bien hacia imágenes o métodos de tratamiento más sofisticados.

[1] Siguiendo la terminología anglosajona, distinguimos entre uso y ocupación del suelo (*land use y land cover*, respectivamente), según nos refiramos a "la actividad humana sobre el territorio o simplemente a los materiales que aparecen sobre él (Chuvieco, 1985b).

Tabla 4.1
Clasificación propuesta para el proyecto de Ocupación del suelo de España (*CORINE-Land Cover*)*

1. Superficies Edificadas e Infraestructuras
   1.1. Zonas urbanas
   1.2. Zonas industriales, comerciales y de transporte.
   1.3. Zonas de extracción minera, vertederos y de construcción
   1.4. Zonas verdes y espacios de recreo.

2. Zonas agrícolas:
   2.1. Tierras de labor anual
   2.2. Cultivos permanentes
   2.3. Praderas
   2.4. Zonas agrícolas heterogéneas

3. Zonas forestales, con vegetación natural y espacios abiertos:
   3.1. Bosques
   3.2. Espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea
   3.3. Espacios abiertos con poca o nula vegetación

4. Zonas húmedas:
   4.1. Humedales continentales
   4.2. Humedales marítimos

5. Superficies de agua:
   5.1. Aguas continentales
   5.2. Aguas marinas

(*) Sólo se recogen los dos primeros niveles de la clasificación. En la adaptación española de la leyenda comunitaria se llega, en algunas cubiertas, hasta los cinco niveles.

Con estas ideas en la mente, y considerando siempre el presupuesto y los medios disponibles, técnicos y humanos, se iniciará la planificación del proyecto. A este respecto, se abordan a continuación algunos aspectos a tener en cuenta para una adecuada selección de la metodología y del tipo de información más conveniente a los objetivos fijados.

4.2. SELECCIÓN DEL MATERIAL DE TRABAJO

Una vez establecida leyenda y escala de trabajo, puede abordarse la elección del material que constituirá la base del estudio. A este respecto, conviene considerar varios elementos: tipo de sensor, fecha de adquisición, soporte de las imágenes y material auxiliar.

4.2.1. Tipo de sensor

En cuanto al primer aspecto, como ya se ha indicado el tipo de sensor más conveniente depende de los objetivos y el nivel de precisión requerido en el proyecto. Lógicamente, los inventarios globales habrán de partir de sensores de baja resolución espacial (tipo NOAA-AVHRR o Meteosat), mientras los de mayor escala se basarán en sensores que ofrecen mayor detalle espacial (Landsat-TM o SPOT-HRV).

No obstante, en otros casos la resolución espacial resulta secundaria frente a la temporal o espectral. Por ejemplo, si el fenómeno estudiado es muy dinámico en el tiempo, como sería el caso de la detección de incendios forestales o la predicción de cosechas, convendrá acudir a sensores de alta resolución temporal (tipo AVHRR), aun sacrificando precisión espacial. En otras ocasiones, la dimensión espectral será dominante, por lo que convendrá acudir a sensores que ofrezcan información en determinadas bandas del espectro, donde se manifieste con mayor claridad el fenómeno de interés. Un buen ejemplo de esta idea serían los estudios de evapo-transpiración de masas vegetales a partir de sensores térmicos (Heilman et al, 1976; Pierce y Congalton, 1988). En definitiva, la resolución espacial, como antes se indicó, es un elemento muy destacado en la selección de imágenes, pero no debe ser el único a considerar.

4.2.2. Fecha de adquisición

La fecha más conveniente para seleccionar la imagen está en estrecha relación con el tipo de fenómeno en estudio. Lógicamente, el momento más idóneo de adquisición será aquel en que mejor se discrimine dicho fenómeno, frente a otros de similar comportamiento espectral. Un trabajo de exploración minera probablemente requiera una fecha invernal, al ser mayor el efecto de sombras y, por tanto, la detección de lineamientos. Por el contrario, un inventario de regadíos sólo puede

realizarse en los meses estivales, julio y agosto, cuando es más claro el contraste con los cultivos de secano. En ocasiones resulta necesario acudir a varias fechas para abordar el estudio: por ejemplo, para seguir el ritmo de crecimiento de un determinado cultivo, o para estudiar los cambios entre dos momentos críticos. En estas situaciones, conviene construir un calendario fenológico de esa cubierta -y de las que ofrezcan un parecido comportamiento espectral-, con objeto de seleccionar las fechas en donde su comportamiento sea más específico del resto.

Cuando, en estos trabajos de cartografía de la cubierta vegetal, se disponga de un presupuesto escaso, puede ser preciso seleccionar una sola fecha, que maximice la separación entre todas las cubiertas. En ese caso, la elección más conveniente será una imagen adquirida en el verano, pues en ese momento es máxima la radiancia media percibida por el sensor, como consecuencia del mayor ángulo de elevación solar. Además, en el caso de nuestro clima mediterráneo, la estación estival coincide con la época de menor nubosidad y precipitación, lo que facilita la selección de imágenes en este período.

4.2.3. Soporte de las imágenes

El soporte sobre el que puede realizarse la interpretación depende del tipo de tratamiento que se aplique. En caso de que se opte por el análisis visual, se requiere abordar tres aspectos: (i) soporte material de la imagen, (ii) escala, y (iii) número de banda o combinación de bandas seleccionada (fig. 4.3).

En lo que se refiere al primer aspecto, el programa EARTHNET de la Agencia Espacial Europea, así como la empresa EOSAT o Spot-Image ofrecen actualmente tres opciones. Las imágenes pueden pedirse en película negativo, en película positivo o en papel. La elección entre ellas dependerá del tipo de análisis que se pretende abordar. Los negativos permiten tantas ampliaciones como sea preciso, y a la escala deseada, pero la calidad de la copia en papel es inferior a la adquirida directamente en este soporte. El film positivo es muy útil para reproducción fotográfica e impresión de la imagen, especialmente cuando se trata de composiciones coloreadas. Por último, el papel garantiza una interpretación directa de alta calidad, pero resulta rígida la escala y no admite copias sucesivas. Cuando se trata de composiciones en color, a partir de los negativos de cada banda pueden obtenerse tantas combinaciones como requiere el intérprete, mientras el film positivo o papel debe solicitarse ya con una determinada combinación de bandas.

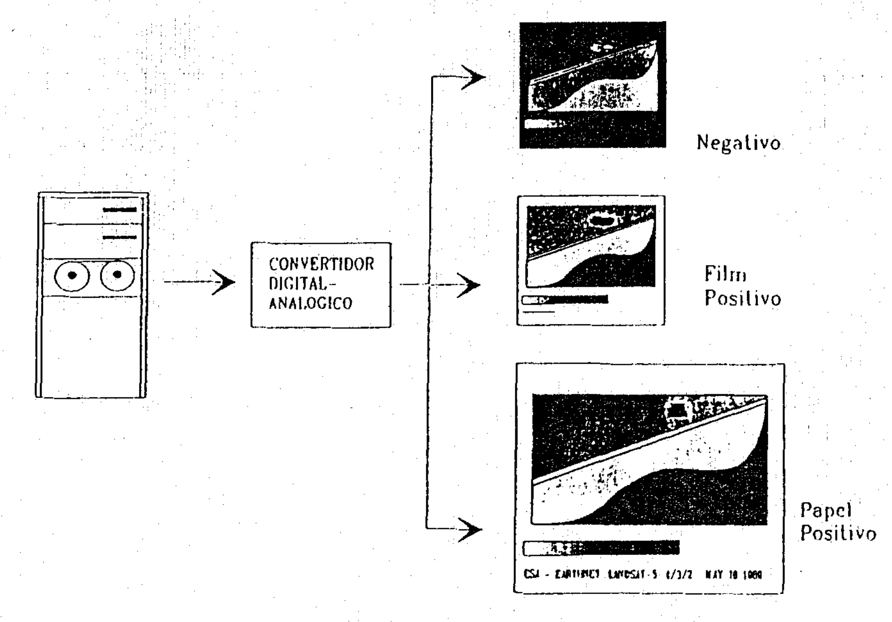


Fig. 4.3 - Soportes más habituales de los productos fotográficos

En cuanto a la escala, los negativos de imágenes Landsat-TM (23 x 23 cm) se ofrecen a escala aproximada 1:500.000, mientras los correspondientes al MSS se presentan a escala 1:1.000.000. Ampliaciones en papel pueden adquirirse a 1:250.000 y 1:100.000, aumentando el coste con el tamaño del documento. Para sensores de menor resolución, tipo AVHRR o Meteosat, la escala es sensiblemente menor. Lógicamente la elección entre una y otra escala, como ya se vio más arriba, depende del objetivo final del trabajo.

Por último, el número de bandas más conveniente para un determinado proyecto depende directamente del fenómeno que se intente estudiar. Si la imagen se requiere para un estudio global, de diversos tipos de cubierta, puede ser una buena opción adquirir los negativos correspondientes a todas las bandas del sensor. A partir de ellos, pueden realizarse tantas combinaciones de color como se estime oportuno, acudiendo a los procesos habituales en las artes gráficas. Si el presupuesto es más limitado, bastará con un film positivo o papel que acoja una combinación coloreada de las tres bandas más convenientes para los propósitos del usuario. Esta opción ofrece, además, una mayor calidad para la reproducción, por cuanto evita procesos fotográficos intermedios.

Cuando se opte por el tratamiento digital de las imágenes, el soporte más habitual es la cinta magnética compatible con ordenador (CCT). Se trata éste de un soporte barato y eficaz para almacenar un gran volumen de datos. Para imágenes TM, tanto la ESA como EOSAT ofrecen la posibilidad de solicitar la escena completa o sólo un cuarto de escena, a un precio considerablemente más asequible. La empresa norteamericana EOSAT ha introducido recientemente una opción denominada "de zonas móviles", por la que puede adquirirse una imagen para una zona geográfica determinada, sin considerar la distribución estándar de órbitas que ofrece el satélite (fig. 4.4).

Asimismo la empresa EOSAT ofrece la posibilidad de adquirir imágenes en disquete de 5,25 pulgadas. Se trata de sub-escenas de 512 x 512 pixels, que pueden resultar idóneas para trabajos piloto o estudios de aplicación sobre pequeñas superficies. El acceso a la imagen es más rápido que en las CCT, así como la inversión original, tanto por el coste de la imagen como por obviar la unidad lectora de cinta. Lógicamente, el coste por unidad de superficie es considerablemente mayor, por lo que no resulta un medio muy rentable en estudios sobre grandes áreas.

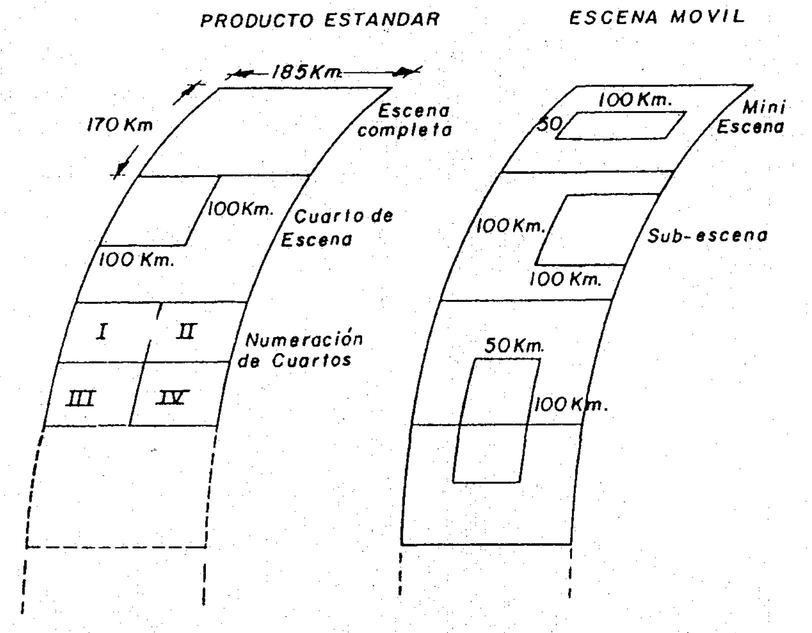


Fig. 4.4 - Productos digitales ofrecidos por la empresa EOSAT (EOSAT, 1988)

También recientemente, la estación distribuidora de *Dundee* (Escocia) ha anunciado la distribución de imágenes AVHRR en disquetes de este mismo formato.

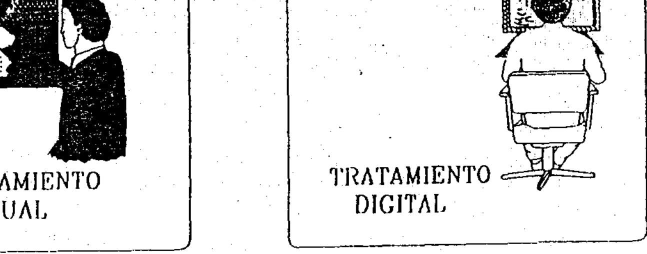
4.3. Selección del método de análisis: ¿tratamiento visual o digital?

En los últimos años se ha desarrollado una cierta polémica sobre el método de análisis más idóneo para abordar un estudio de teledetección espacial. Como ya se comentó más arriba, las imágenes son adquiridas en formato numérico, gracias a una conversión analógico-digital realizada a bordo del satélite. Por tanto, se almacenan originalmente en CCT, con lo que el tratamiento digital resulta la opción de análisis más inmediata. Las mejoras en los equipos de grabación digital-analógica (filmadoras láser) permite ahora contar con productos fotográficos de gran calidad, susceptibles de interpretación visual en múltiples aplicaciones.

En este contexto, cabe analizar cuál de los dos métodos, digital o visual, resulta más idóneo para explotar adecuadamente el flujo de datos que la teledetección espacial ofrece. La respuesta, una vez más, no resulta sencilla. Simplificando un poco las cosas, pueden señalarse varios aspectos que conviene tener en cuenta antes de tomar una decisión en uno u otro sentido (fig. 4.5): (i) medios económicos y humanos disponibles, (ii) rapidez y precisión exigida, (iii) tipo y continuidad de las tareas, (iv) homogeneidad de la superficie analizada.

La disponibilidad de medios marca el primer criterio de decisión. En muchas ocasiones se asume que cualquier trabajo en teledetección espacial exige una considerable inversión de partida, por lo que se obvia una técnica que podría ser muy útil aun en situaciones de modesto presupuesto. A nuestro juicio, este planteamiento no es totalmente correcto, puesto que el análisis visual no requiere inversiones económicas importantes y puede garantizar un nivel de precisión suficiente para una determinada aplicación. Por ejemplo, el coste por unidad de superficie de una imagen en falso color es considerablemente inferior al de la fotografía aérea, y puede ofrecer una exactitud considerable (superior al 80 %) para un proyecto de media escala (1:200.000). Si se pretende realizar una cartografía de la vegetación a esta escala, la imagen de satélite puede salvar costes y reducir notablemente el tiempo de tratamiento frente a la fotografía aérea, que ofrece un detalle tal vez excesivo para la escala final del mapa. Por otra parte, el análisis visual emplea criterios de interpretación similares a la foto-interpretación clá-





TRATAMIENTO VISUAL	TRATAMIENTO DIGITAL
INVERSION INICIAL ESCASA	INVERSION ELEVADA
COSTES LINEALES	COSTES SE REDUCEN CON LA SUPERFICIE
REQUIERE CONVERSION DIGITAL ANALOGICA	PERMITE TRABAJO CON INFORMACION ORIGINAL
NO PRECISA ALTA ESPECIALIZACION	PRECISA ALTA ESPECIALIZACION
BUENA PRECISION EN CLASES HETEROGENEAS	BAJA PRECISION EN CLASES HETEROGENEAS
RESTITUCION COMPLEJA	CORRECCION GEOMETRICA SENCILLA Y RAPIDA
INVENTARIO TEDIOSO E INEXACTO	INVENTARIO INMEDIATO
REQUIERE DIGITIZACION PARA CONECTARSE A UN SIG	CONEXION DIRECTA (FORMATO RASTER) O VECTORIZACION (FORMATO VECTORIAL)

Fig. 4.5 - Ventajas e inconvenientes del análisis visual frente al digital en la interpretación de imágenes

sica (tono, textura, tamaño, localización, etc.), por lo que no requiere un entrenamiento muy especializado.

En situaciones de presupuesto más desahogado puede abordarse el tratamiento digital de imágenes. El apoyo del ordenador, en principio, garantiza un tratamiento más rápido, económico y certero, pero requiere una importante inversión inicial. Esta no sólo se refiere a los equipos informáticos que permiten el tratamiento de las imágenes, sino también al entrenamiento del intérprete en unas técnicas de análisis mucho menos convencionales. El tratamiento digital requiere una buena base estadística, conocimiento de sistemas informáticos y lenguajes de programación. Muchas veces estos componentes no forman parte de los curricula vigentes en las ciencias de la Tierra, por lo que puede resultar trabajoso el acceso al tratamiento digital para personas provenientes de esos campos de aplicación. En cuanto al coste de los equipos, aún suponen una inversión importante, pese a las constantes mejoras en la tecnología micro-informática, con el consiguiente abaratamiento de los precios.

En pocas palabras, el tratamiento digital requiere mayor inversión económica y entrenamiento que el análisis visual. Como contrapartida, proporciona mayor versatilidad, rapidez y exactitud. No obstante, tales ventajas no son absolutas, sino muy dependientes de la configuración del equipo disponible, del entrenamiento del intérprete y de la complejidad del área de estudio. Por ejemplo, la velocidad de proceso está en función del equipo disponible, por lo que no puede afirmarse que todo tratamiento digital sea más rápido que el visual. El tratamiento digital basado exclusivamente sobre un ordenador personal, sobre imágenes de alta resolución y aplicado a zonas muy amplias, puede resultar bastante lento, por el importante volumen de datos a procesar. La misma zona puede ser interpretada visualmente en menos tiempo, siempre que la escala sea pequeña y no se requiera una leyenda excesiva pormenorizada.

En cuanto a la exactitud, también ha de matizarse la superioridad del tratamiento digital. Varios autores han comprobado la complejidad de clasificar digitalmente cubiertas que ofrecen una gran heterogeneidad espacial. El caso de las áreas urbanas es el más claro a este respecto (Toll, 1984; Atkinson et al, 1985). Se trata de zonas en donde se mezclan tejados, aceras, asfalto, jardines y espacios abiertos o deportivos. Esta complejidad puede identificarse visualmente gracias a criterios muy difícilmente traducibles a la clasificación digital: localización, textura, tamaño, formas, etc., por lo que la interpretación visual ofrecerá, en este caso, mayor exactitud que la digital. En otras categorías, la relación

resulta contraria, ya que el ojo humano no es capaz de detectar variaciones tonales que sí son diferenciables numéricamente (humedales, transiciones de vegetación, distintos cultivos...).

Otro elemento a tener en cuenta para elegir la intepretación visual o digital, se refiere al tipo y continuidad de las tareas requeridas en el proyecto (fig. 4.6). Si el estudio sólo precisa un croquis de interpretación y no una plasmación cartográfica, la interpretación visual no ofrece inconvenientes. Ahora bien, si se pretende obtener un mapa deben transferirse todas las líneas que definen las distintas cubiertas a la cartografía base, lo cual resulta muy tedioso, y casi siempre poco preciso. El tratamiento digital, por el contrario, permite realizar este proceso con gran rapidez y -salvo terrenos muy accidentados- elevada precisión, gracias a las técnicas de corrección geométrica de la imagen (6.5.3). Lógicamente, estas correcciones digitales pueden aplicarse como paso previo a la interpretación visual, pero esto requeriría realizar las inversiones antes aludidas para el tratamiento asistido por ordenador. Recientemente, algunos centros distribuidores han comenzado a facilitar imágenes de satélite ya corregidas, lo que permite obviar esta restitución en el análisis visual, si bien sólo en el caso de sensores de alta resolución.

Otras operaciones que resultan muy beneficiadas con el tratamiento digital son el inventario de resultados y su integración con otras variables geográficas. El inventario resulta muy tedioso en interpretación visual, pues es necesario planimetrar todas las superficies incluidas en cada tipo de cubierta. En el caso del tratamiento digital basta realizar un cálculo de frecuencias -esto es, del número de pixels incluidos en cada clase-, para conocer la superficie ocupada por cada una de ellas (6.9.2), por cuanto sabemos la equivalencia superficial de cada pixel. Respecto a la posibilidad de combinar los resultados del análisis con otro tipo de variables temáticas: suelos, hidrografía o pendientes, la integración manual resulta muy compleja (técnica de superponibles), mientras la asistida por ordenador supone un proceso relativamente sencillo, en el marco de los denominados Sistemas de Información Geográfica (cap. 8). Como tendremos ocasión de estudiar, la entrada de información en estos Sistemas requiere una previa digitización para el caso del análisis visual, mientras resulta un proceso casi inmediato en tratamiento digital, ya que la información ya se encuentra en formato numérico.

En resumen, y siguiendo nuestra opinión particular, ambos métodos de trabajo se complementan. El tratamiento digital permite realizar operaciones complejas, muy costosas o inaccesibles al análisis visual. Garantiza una clasificación más rápida de la zona de estudio, mantenien-

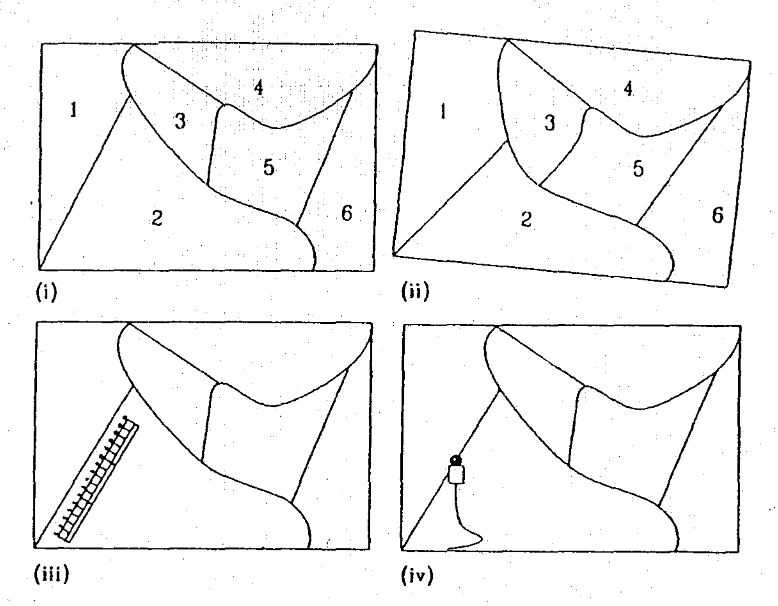


Fig. 4.6 - Tareas anejas a la interpretación de imágenes: (i) delimitación de categorías, (ii) restitución, (iii) medición y (iv) digitización.

do una coherencia en la asignación de áreas vecinas a dos categorías. Por su parte, el análisis visual es una buena alternativa para actualizar cartografía existente o realizar inventarios a escalas medias. Auxilia a la clasificación digital para evitar confusiones entre coberturas heterogéneas, o entre aquellas que son similares espectralmente pero de distinto significado temático. El tratamiento digital supone una fuerte inversión de entrada, pero los costes van disminuyendo al aumentar la superficie analizada. Por el contrario, los costes del análisis visual son lineales, suponiendo una débil inversión de partida. En este marco, la inversión en equipos informáticos parece justificada en tres casos: (i) cuando el objeto o la escala del estudio no sea abordable mediante análisis visual, (ii) cuando se pretenda trabajar sobre áreas extensas y repetidamente, y (iii) cuando se pretenda introducir los resultados en un Sistema de Información Geográfica.

4.4. Fases del proceso de trabajo

Las aplicaciones de la teledetección espacial son muy numerosas, por lo que resulta complejo establecer un marco general, que pueda ser

válido para todas ellas. No obstante, y aun a riesgo de caer en la simplicidad, puede ser conveniente introducir algunas ideas sobre el proceso de trabajo con este tipo de imágenes. No será difícil que cada usuario pueda ajustar este esquema a sus propios intereses.

El proceso propuesto contempla las siguientes fases (fig. 4.7):

(i) Definición expresa y concreta de objetivos, señalando las limitaciones que se presentan, ya sea derivadas del área de estudio, ya del tiempo o escala requeridos en el trabajo o de los medios disponibles.

(ii) Propuesta metodológica, en función de la literatura consultada sobre el tema. Un estudio bibliográfico resulta vital para orientar el proceso de análisis, evitando inversiones innecesarias.

(iii) Trabajos de campo preparatorios y acopio de información auxiliar. En este primer contacto, los trabajos de campo permiten familiarizar al intérprete con la zona objeto de estudio, estudiar sus rasgos medio ambientales y humanos. Si se trata de una aplicación relacionada con la cubierta vegetal, resulta conveniente elaborar un calendario fenológico de las especies de interés con objeto de seleccionar la fecha más apropiada para el tratamiento. En esta fase pueden incluirse las medidas a realizar con radiómetros de campo, que permiten caracterizar espectralmente la cubierta y seleccionar el sensor y las bandas más apropiadas para discriminarla.

(iv) Selección de la información: tipo de sensor, fecha más conveniente, soporte de la imagen, número y localización de bandas, etc.

(v) Selección de la leyenda de trabajo, basada sobre las características de la zona y las posibilidades que brinda el sensor seleccionado.

(vi) Trabajos de campo. Una vez obtenidas las imágenes, esta segunda fase de campo sirve para familiarizar al intérprete con la imagen, caracterizando sobre ella la variación de las distintas clases señaladas en la fase anterior.

(vii) Identificación y clasificación de estas categorías, ya sea a través del análisis visual, ya del tratamiento digital, extendiendo al resto de la imagen la experiencia acumulada en el muestreo de campo realizado previamente.

(viii) Revisión de campo, para la verificación de resultados, de acuerdo al porcentaje de fiabilidad requerido y a la tasa de error tolerable en el muestreo.

(ix) Restitución. Una vez obtenidos unos resultados suficientemente fiables, se trata de otorgar validez cartográfica a los resultados; esto es, que el documento obtenido pueda superponerse sobre la cartografía base. Esta restitución puede ser digital o analógica, en función del método seguido en el análisis.

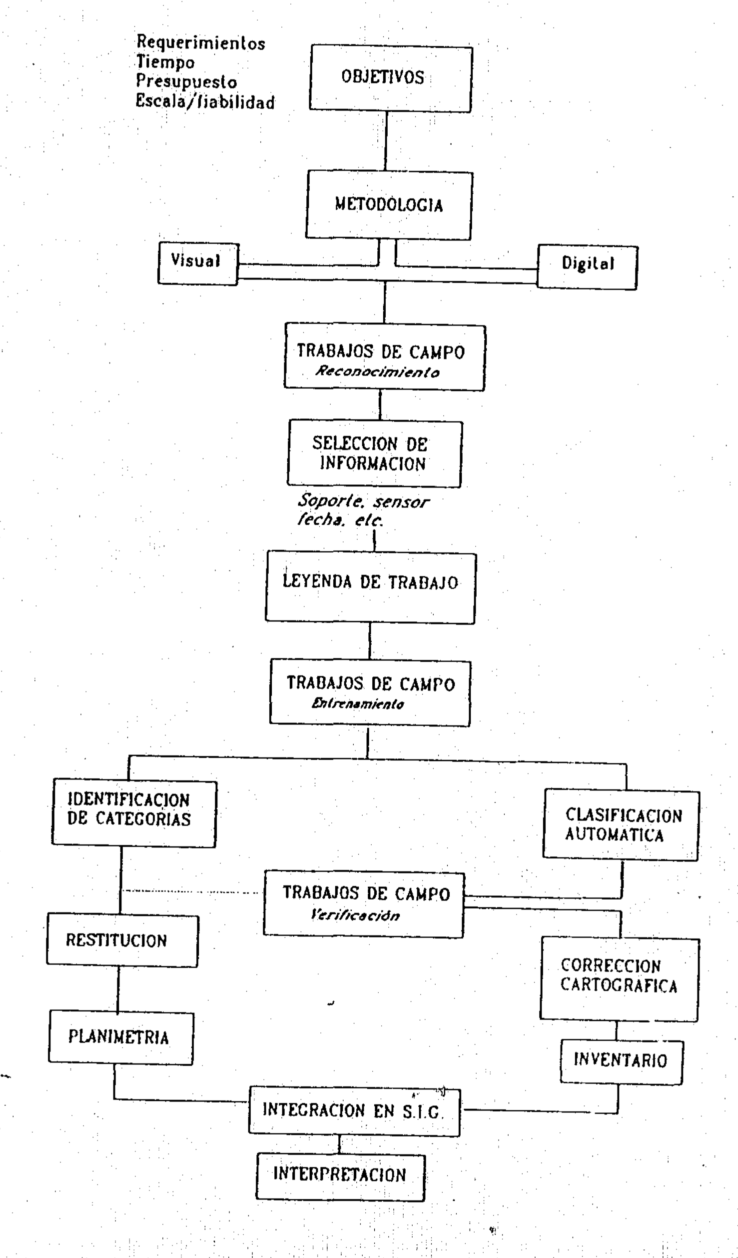


Fig. 4.7 - Fases que incluye un proyecto de orientación medio ambiental

(x) Inventario. Aquí se trata de cuantificar la extensión superficial de cada una de las categorías, una vez se hallen representadas sobre un mapa de escala conocida. Al igual que en la fase anterior, será divergente, de acuerdo al método de análisis: conteo de frecuencias (digital), o planimetría (visual).

(xi) Integración de los resultados obtenidos con otro tipo de variables espaciales. Esto supone la digitización de la cartografía final o, en caso de tratamiento digital, las modificaciones precisas para que se ajuste perfectamente a la cartografía convencional disponible (proyección y nivel de detalle).

(xii) Interpretación de la cartografía resultante, poniéndola en relación con las variables humanas y del medio físico que afectan al área de estudio.

Como puede observarse, este esquema está bastante centrado en aquellas aplicaciones que persigan elaborar una cartografía temática a partir de la teledetección. Geógrafos, biólogos, agrónomos, forestales, edafólogos o cartógrafos, pueden incluirse en este grupo, por lo que parece suficientemente amplio para una gama variada de expertos.

5. INTERPRETACIÓN VISUAL DE IMÁGENES

Para la mayor parte de los lectores de esta obra, así como para el propio autor, el aspecto más importante de la teledetección es el aprovechamiento temático de las imágenes. En consecuencia, los dos capítulos que siguen constituyen el eje sobre el que gira, fundamentalmente, este tratado.

Ya en el capítulo anterior se comentaron los rasgos principales de esta labor interpretativa. Allí sólo se trataba de presentar las dos alternativas que se brindan al intérprete: (i) abordar un análisis visual, basándose en similares principios a la foto-interpretación clásica, y (ii) optar por el tratamiento digital de la imagen, aprovechando los vastos recursos que el ordenador aporta al análisis de datos.

En el presente apartado se estudia con más profundidad la interpretación visual de imágenes, para pasar, en el próximo, a exponer los principios del tratamiento digital. La mayor parte de los comentarios incluidos en este capítulo se refieren a imágenes adquiridas por diversos sensores de la familia Landsat. El amplio rango de aplicaciones que ofrecen y la extensión de su empleo, justifican esta elección. No obstante, la mayor parte de las ideas aquí expresadas pueden fácilmente aplicarse a imágenes adquiridas por otros sensores, especialmente a aquellos comprendidos en el dominio óptico, y de similar resolución a los incluidos en el programa Landsat (SPOT-HRV, MOS-MESSR, IRS-LISS, etc.)

5.1. FAMILIARIZACIÓN CON IMÁGENES ANALÓGICAS

5.1.1. Información incluida en los productos fotográficos

Una rigurosa interpretación de imágenes pasa por tener en cuenta los principales rasgos de su adquisición, así como de los tratamientos que puedan haber abordado las antenas receptoras. Este tipo de información

está incluida en el documento analógico que sirve de base a la interpretación visual.

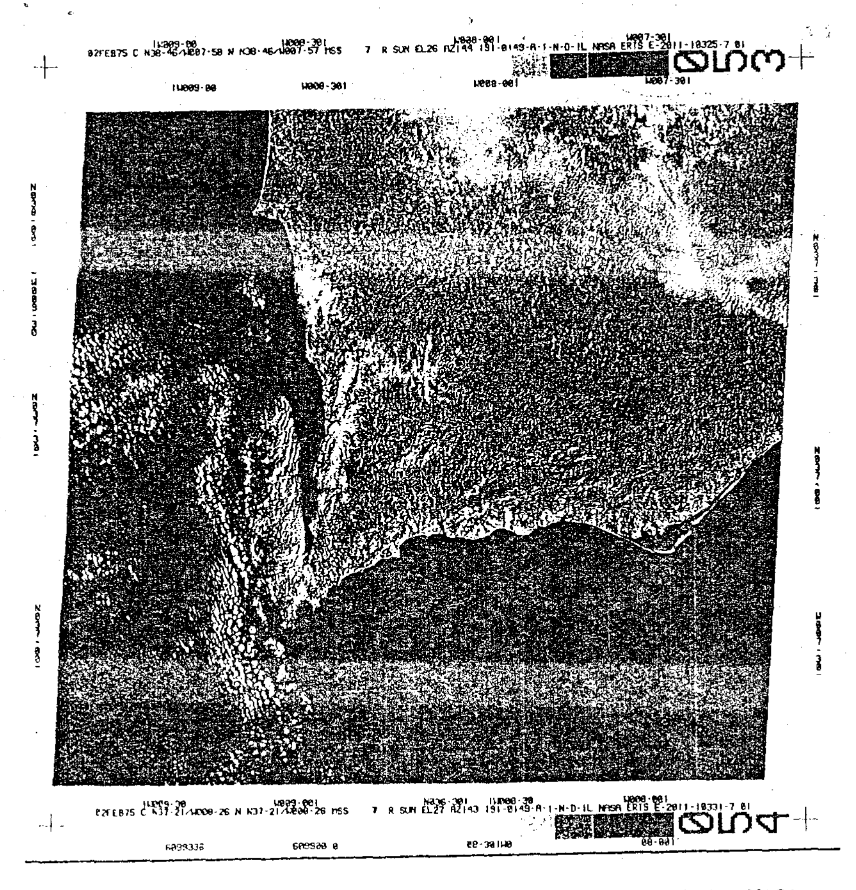


Fig. 5.1 - Imagen Landsat de la costa portuguesa en el formato original de NASA (Cortesía R.Núñez - Inst. Geográfico Nacional)

Las anotaciones que incluye una imagen difieren según el sensor que la adquiere y la organización que la procesa. La agencia espacial norteamericana NASA, se encargó de recibir las primeras imágenes adquiridas por el satélite Landsat, canalizando, a través del *U.S.Geological Survey, EROS Data Center*, su distribución. En estos años, las imágenes en papel o negativo incluían la siguiente información auxiliar:

. Fecha de adquisición (2 de Febrero de 1975, en el ejemplo de la figura 5.1)
. Coordenadas del centro de la imagen (37 ° 21' Norte y 8° 26'Este)
. Coordenadas del punto nadir (punto de intersección entre la superficie terrestre y una perpendicular desde el centro de adquisición)
. Indicador del sensor y banda empleada (MSS, banda 7)
. Centro productor de la imagen
. Angulo de elevación solar, medido desde el norte geográfico y en el sentido de las agujas del reloj (27°).
. Angulo acimutal (143 °)
. Datos del procesado (correcciones aplicadas, escala, proyección, compresión o no de los datos, etc.)
. Agencia y proyecto (NASA ERTS)
. Código de identificación de la escena (número de satélite, días transcurridos desde el lanzamiento, hora, minutos y segundos de la adquisición: E - 2011 - 10331 - 7 01).

Debajo de estos datos se situaba una escala de grises, con objeto de comprobar la calidad de la reproducción.

En los años ochenta, otras agencias especiales comenzaron a encargarse de la distribución de imágenes. Para todo el Centro y Sur de Europa, comenzó entonces la Agencia Espacial Europea a encargarse de la recepción de los datos, gracias a una estación situada en Fucino, cerca de Roma, mientras el programa EARTHNET se hacía cargo de la red distribuidora.

Como consecuencia de esto, se modifican las anotaciones en los productos fotográficos del satélite Landsat, ajustándose el siguiente esquema (fig. 5.2):

. Escala de grises en el borde inferior de la imagen
. Por debajo de ella se incluye información sobre fecha de adquisición, número de satélite, y código de identificación de la escena. En el caso de la figura 5.2, la imagen se adquirió el 29 de enero de 1982 por el satélite Landsat-2, y la escena se reconoce por los números 217 y 032.
. En el margen izquierdo la banda espectral, datos y fecha del procesado y centro de tratamiento (Telespazio, 26 de Mayo de 1982).

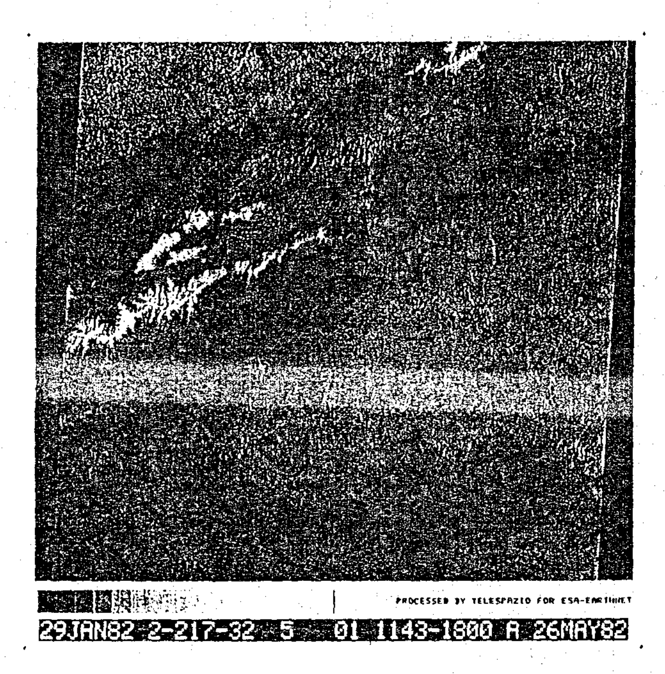


Fig. 5.2 - Imagen Landsat en el formato original de la E.S.A.

A partir del lanzamiento de los Landsat-4 y 5, se vuelve a modificar la información auxiliar que incluyen los productos fotográficos, enriqueciéndose notablemente frente al anterior formato. Desde ese momento, la red europea EARTHNET recoge los siguientes datos (fig. 5.3):

. En la cabecera del negativo se señalan los datos más importantes de la adquisición: fecha, satélite, sensor, número de banda, código de la escena y, en su caso, número de cuadrante. En el caso de la figura 5.3, se trata de una imagen adquirida el 2 de agosto de 1984, por el satélite Landsat-5, sensor Thematic Mapper, correspondiente a la banda 1, traza 201, fila 032, cuadrante 2.

. En el borde inferior, aparece la escala de grises (indicando, además, el valor digital al que corresponde cada intensidad), centro y fecha de proceso y escala gráfica.

. Por fin, la última línea del negativo incluye algunos datos auxiliares, como son la fecha de adquisición, coordenadas del centro de la escena, ángulo de elevación y acimut solar, nivel de corrección radiométrica y geométrica, e identificación de la escena, en el código NASA y en el sistema europeo.

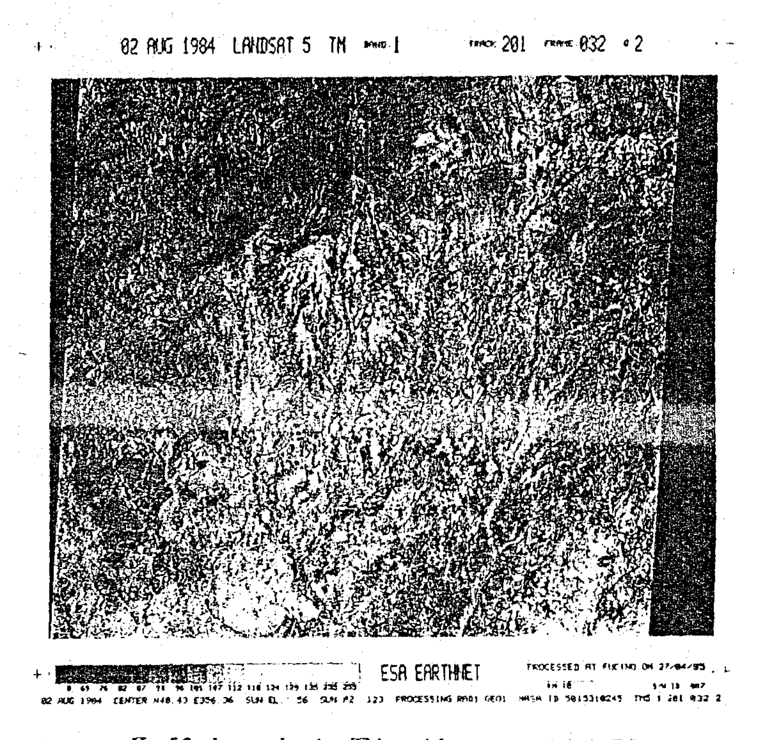


Fig. 5.3 - Imagen Landsat-TM en el formato actual de la E.S.A.

5.1.2. Referenciación geográfica de la imagen

Con estos datos, ya estamos en disposición de comenzar el análisis de la imagen. Una primera forma de familiarizarse con su significado será referenciarla geográficamente; esto es, localizar sobre la imagen rasgos identificables sobre un mapa convencional. Este ejercicio puede abordarse en varias fases. En la primera, apoyándose en un mapa de similar escala, pueden situarse los embalses y cursos de agua más importantes de la zona. A partir de ellos, una segunda inspección de la imagen permite identificar aspectos humanos del territorio, como son las ciudades más importantes y las principales vías de comunicación. Los accidentes montañosos se identificarán en una tercera fase, puesto que se trata de aspectos representados más abstráctamente en el mapa, y, por tanto, de difícil delimitación. Masas de vegetación o rasgos efímeros relacionados con la imagen (como, por ejemplo, incendios o agentes contaminantes), podrán interpretarse en una última fase, puesto que rara

... localización de todos estos ... retícula de referencia, tal y como ... caso, se trata de fragmento de una ... de julio de 1981, y correspondiente a la ... junto está diseñado a una escala similar ....000), y permite apoyar el presente ejercicio. Una ... de la imagen servirá para situar los principales ... ona: Santa Teresa (B7), Rosarito (E13), Valdecañas (E17), C... (Q15), Santillana (R2), y San Juan (N9). A partir de ellos, no

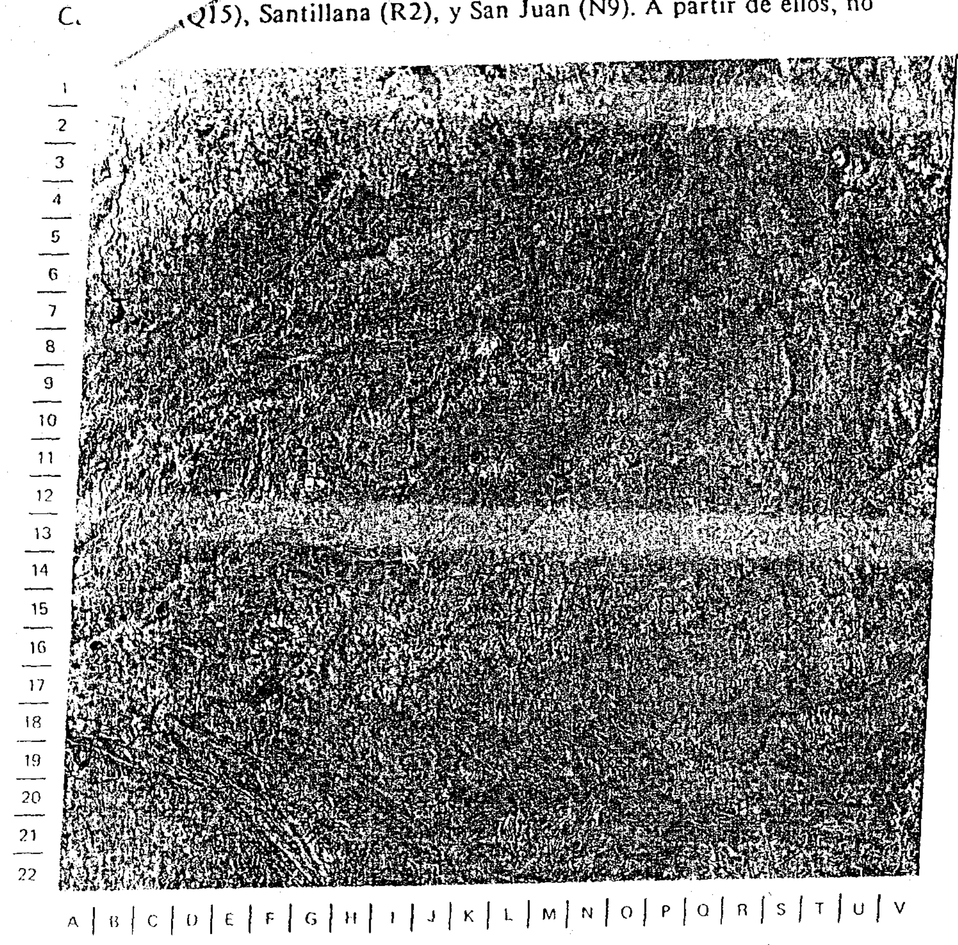


Fig. 5.4a - Imagen MSS sobre la zona centro

es difícil reconstruir el trazado de los cursos fluviales: Tietar, Alberche, Guadarrama, Jarama y Tajo.

Estos cursos facilitan la localización de la ciudad de Madrid (T5), con su aeropuerto (U4), Toledo (S14), Talavera (K15) y Avila (S5), así como de las principales autovías nacionales.

Los Montes de Toledo ocupan el borde inferior de la imagen, mientras el Sistema Central, y concretamente la Sierra del Guadarrama al Este y

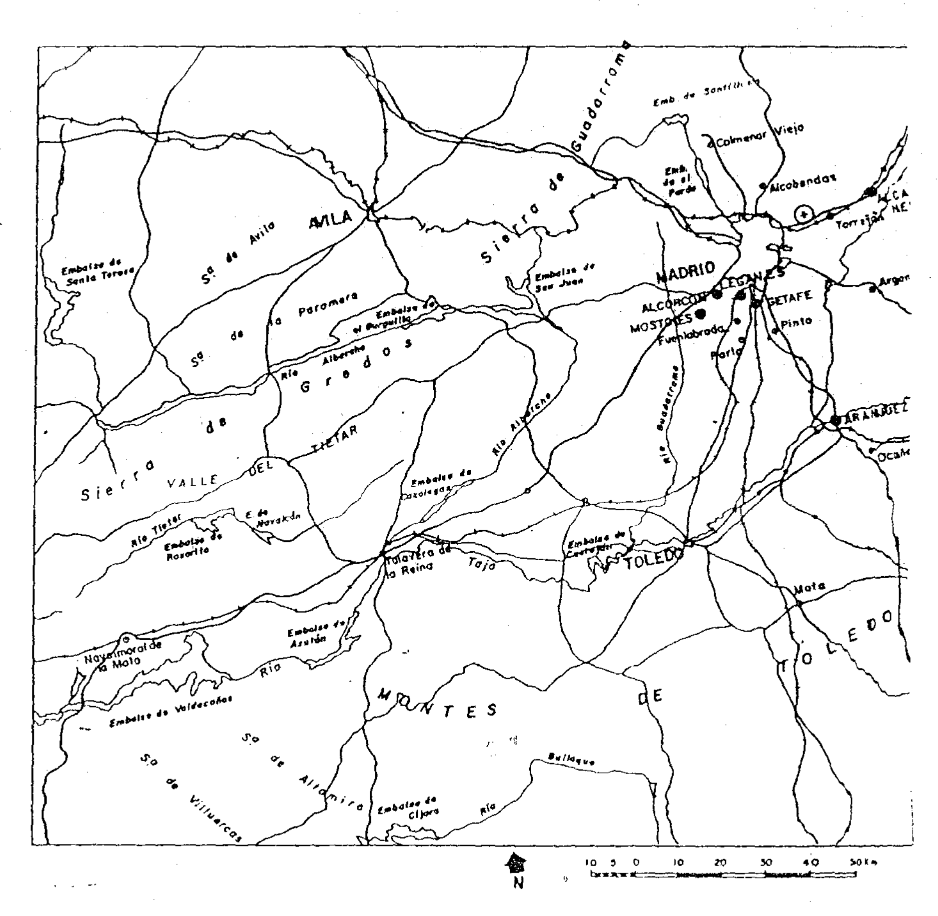


Fig. 5.4b - Croquis cartográfico de la misma zona

Gredos al Oeste, se sitúa en el margen superior. La ocupación vegetal de la zona puede extraerse -muy a grandes rasgos- a partir de los tonos de gris que presenta la imagen. Se identifican las masas forestales del Monte del Pardo y de las áreas montanas, con tonos gris medio a oscuro. En contraste con ellas, los valles se ocupan por tonos mucho más claros, testigo de cultivos herbáceos por haberse producido ya la recolección.

Este pequeño ejercicio sirve de preámbulo para analizar los criterios empleados en el análisis visual de imágenes.

5.2. CRITERIOS VISUALES PARA LA INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES

Como ya tuvimos ocasión de comentar anteriormente (4.3), una de las principales ventajas del análisis visual sobre el digital es su capacidad para incorporar a la interpretación de la imagen criterios complejos. Mientras el tratamiento digital se basa, casi exclusivamente, sobre la intensidad radiométrica de cada pixel -en las distintas bandas utilizadas para la interpretación-, el análisis visual puede utilizar otros elementos, como son la textura, estructura, emplazamiento o disposición, muy difíciles de definir en términos digitales.

Estos criterios nos permiten discriminar categorías con un comportamiento espectral parejo, aunque con un significado temático bien distinto. Por ejemplo, algunos cultivos en regadío suelen ofrecer una respuesta espectral muy parecida a los parques urbanos, por cuanto -de hecho- ambas cubiertas están formadas por las mismas o similares especies vegetales. Sin embargo, su significado temático es claramente distinto, y así debe incluirse en la cartografía final. Digitalmente la distinción es muy compleja, ya que los valores numéricos de ambas cubiertas son muy similares. Ahora bien, basta incorporar un criterio visual sencillo, como es el caso del contexto geográfico para separar ambas cubiertas. Las nuevas técnicas de la denominada 'inteligencia artificial' pretenden incorporar estos criterios más complejos al tratamiento numérico de los datos, pero aún restan algunos años de investigación para que esto se pueda llevar a la práctica.

Entre las pautas visuales manejadas en teledetección espacial, algunas son comunes con la fotografía aérea -tono, textura, estructura, sombras, contexto, etc.-, otras son más propias de las imágenes especiales, principalmente en lo que se refiere a la dimensión multi-espectral y multi-temporal de las observaciones, severamente limitada en fotografía

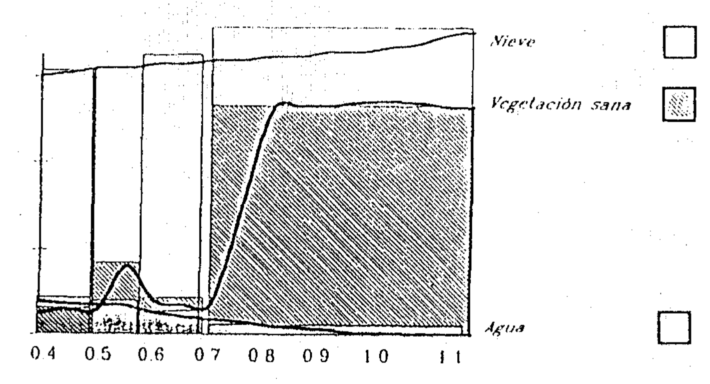


Fig. 5.5 - Tono y signaturas espectrales

aérea, y un último grupo corresponde a criterios tradicionales en foto-interpretación que aún no resultan accesibles a imágenes espaciales, como es el caso de la cobertura estereoscópica, tan vital para estudios del relieve o de la ocupación del suelo. En cualquier caso, ya sean nuevos o tradicionales, los criterios visuales deben manejarse en este caso con cierta precaución, por cuanto las escalas de trabajo y la geometría de adquisición son muy distintas a las conocidas tradicionalmente en fotografía aérea.

5.2.1. Tono

El tono, como es sabido, hace referencia a la intensidad de energía recibida por el sensor para una determinada banda del espectro. En un producto fotográfico, los pixels con tonos oscuros indican aquellas áreas sobre las que el sensor detectó una señal baja, mientras las zonas claras son testigo de altos valores de radiancia. En otras palabras, el tono se relaciona estrechamente con el comportamiento espectral de las distintas cubiertas, para la banda particular del espectro sobre la que se trabaje.

En consecuencia, el tono característico de una cubierta varía con la banda del espectro considerada. Una superficie ocupada por vegetación vigorosa ofrece tonos oscuros en las bandas visibles del espectro, especialmente en el azul y rojo, como consecuencia de la alta absortividad de los pigmentos de la hoja en esas longitudes de onda (2.5.2). Por el contrario, aparece en tonos claros si la imagen corresponde al infrarrojo cercano, por cuanto, en esa región del espectro, la hoja vigorosa ofrece una elevada reflectividad. En consecuencia, para interpretar los tonos que ofrece la imagen se ha de tener presente el

comportamiento espectral de las distintas cubiertas de interés. De otra forma, el intérprete puede entrenarse a reconocer mecánicamente algunas categorías, pero no alcanzará a comprender plenamente las razones de las diferencias tonales que observa.

Un intérprete avezado podrá reconocer múltiples categorías por sus tonos en distintas bandas del espectro. Por ejemplo, la vegetación tiende a ofrecer tonos oscuros en las bandas visibles y muy claros en el infrarrojo cercano, mientras el agua ofrece valores oscuros en ambas, y la nieve presenta un tono blanco relativamente uniforme (fig. 5.5). Una mayor experiencia permite seleccionar las bandas más idóneas para reconocer determinados rasgos de interés: modelos de drenaje y morfología (infrarrojo cercano), trazado urbano (verde-rojo), turbidez en el agua (azul), delimitación tierra/agua (infrarrojo cercano), vegetación (rojo e infrarrojo cercano).

A partir de estas ideas, parece evidente que el tono es uno de los principales criterios de interpretación visual. Pese a ello, una representación fotográfica de una imagen siempre supone una pérdida considerable de los tonos detectados por el sensor. Como ya vimos en 3.2, la mayor parte de los satélites de recursos naturales cuentan con sensores de alta resolución radiométrica. Dicho de otra forma, en la imagen original se distinguen hasta 256 niveles de intensidad -o, si se prefiere, de tonos de gris- en cada una de las bandas del espectro sobre las que se adquiere información. La representación fotográfica de esa imagen nunca recoge tantos niveles de gris, entre otras cosas porque el ojo humano no sería capaz de distinguirlos. Habitualmente, las imágenes fotográficas incluyen entre 16 y 64 niveles de gris, lo que supone una severa pérdida de la información original. En definitiva, el análisis visual siempre es menos preciso que el digital para diferenciar los contrastes de intensidad presentes en la imagen.

5.2.2. Color

Varios autores han puesto de manifiesto que el ojo humano es más sensible a las variaciones cromáticas que a la intensidad luminosa (Barret y Curtis, 1982; Jiménez y García, 1982). Si a esto añadimos el aumento de información que supone la mezcla de varias bandas del espectro, fácilmente se comprende que el color resulta un elemento básico en la interpretación visual de imágenes.

Como es bien sabido, el color que aprecian nuestros sentidos es fruto de la reflectividad selectiva de los objetos a distintas longitudes de onda.

Aquellas superficies con alta reflectividad en longitudes de onda cortas, y baja en el resto, aparecen con color azul, mientras ofrecen un tinte rojo si absorben las longitudes cortas y reflejan las largas. Nuestro ojo sólo percibe las longitudes de onda comprendidas entre 0,4 y 0,7 μm, separando la energía recibida en tres componentes de acuerdo a la sensibilidad espectral de nuestras células sensoras. Esos tres componentes son los denominados colores primarios: azul, verde y rojo, a partir de los cuales puede reconstruirse cualquier otro color del arco iris.

Una impresión similar al color se obtiene con cualquier instrumento que permite separar esas tres bandas del espectro, y combinar, posteriormente, cada una de ellas aplicándole uno de los tres colores elementales. Este es el criterio que se sigue en las composiciones coloreadas, en donde se aplica los colores primarios a tres bandas captadas por el sensor, en el orden y criterio que se estime más oportuno (fig. 5.6). Si el sensor recoge información sobre las bandas del espectro azul, verde y rojo, puede obtenerse una composición en color natural. De otra forma, la composición coloreada no se ajusta a los colores que aprecian nuestros sentidos, aunque puede ser -y, de hecho, así suele ser- más interesante desde el punto de vista interpretativo.

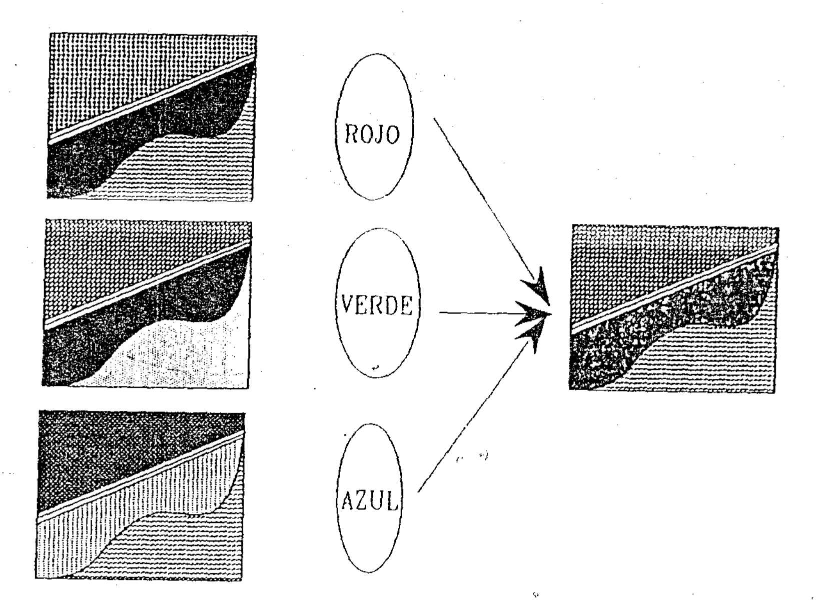


Fig. 5.6 - Formación del color en imágenes multiespectrales

Entre las múltiples combinaciones de color que se han empleado en análisis visual, la más destacada sin duda es la denominada falso color o infrarrojo color. Se obtiene desplazando hacia longitudes más largas las bandas del espectro visible. En lugar de aplicar los colores azul, verde y rojo a sus respectivas bandas del espectro, se aplican a las bandas verde (V), rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC), respectivamente. Esto supone originar una clave de color nueva, extraña a la forma habitual con la que apreciamos el color, pero de gran valor temático.

Su profusa utilización se relaciona con la resolución espectral a la mayor parte de los sensores espaciales. Desde el inicio de la serie Landsat, se han venido distribuyendo imágenes en falso color, por cuanto el sensor MSS sólo permitía esta composición (IRC, R, V), al no adquirir información en otras bandas del espectro. Este es también el caso de los sensores instalados en los satélites SPOT, MOS ó IRS (3.5), por lo que sigue siendo la composición multibanda más frecuente.

Aunque más tarde comentaremos el significado de los colores que aparecen en este tipo de composición, puede ser conveniente incluir una simple clave de color, con objeto de familiarizar al intérprete con este tipo de representaciones (fig. 5.7*). Las tonalidades más habituales en ella se corresponden con las siguientes cubiertas (Tindal, 1978):

. Rojo-magenta. Denota vegetación vigorosa, como cultivos regados, prados de montaña o bosques de caducifolias en imágenes de verano, y cultivos herbáceos de secano en imágenes de primavera. El estudio detallado de la intensidad y saturación del rojo permite identificar diversas cubiertas vegetales, así como estimar su ciclo de crecimiento y vigor.

. Rosa. Muestra áreas vegetales menos densas y/o vegetación en temprano estado de crecimiento. Las áreas suburbanas en torno a las grandes ciudades, con sus pequeños jardines y árboles diseminados, aparecen a veces en ese color.

. Blanco. Areas de escasa o nula vegetación pero de máxima reflectividad: nubes, arenas, depósitos salinos, canteras, suelos desnudos.

. Azul oscuro a negro. Superficies cubiertas total o parcialmente por agua: ríos, canales, lagos, embalses. En zonas volcánicas, los tonos negros pueden asimismo identificar flujos de lava.

. Gris a azul metálico. Ciudades o áreas pobladas, si bien puede asimismo tratarse de roquedo desnudo.

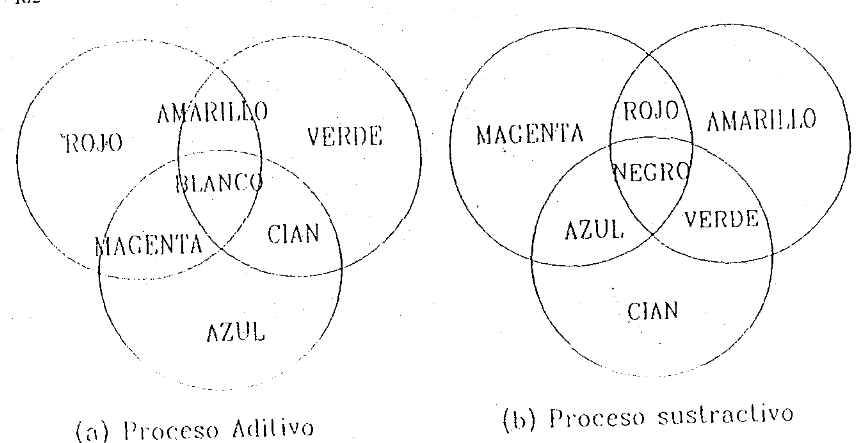
. Marrón. Vegetación arbustiva, muy variable en función de la densidad y del tono del sustrato. Los tonos más oscuros indican presencia de materiales paleozoicos (pizarras), mientras los matorrales calcícolas, menos densos normalmente, ofrecen una coloración más clara.

. Beige-dorado. Identifica zonas de transición: prados secos, frecuentemente asociados con el matorral ralo.

Cuando se comenzaron a adquirir imágenes del sensor TM, se abrió la posibilidad de diseñar nuevas composiciones. La inclusión de una banda en el azul (A) permite al TM obtener composiciones en color natural (A,V,R), mientras sus nuevas bandas en el infrarrojo medio y térmico, amplían notablemente las posibilidades de combinar información multi-banda. Con motivo de ello, varios autores han intentado establecer algún indicador, más o menos objetivo, que ayude a seleccionar las bandas más idóneas para una composición en color. Los criterios más estudiados son los de tipo estadístico: análisis de componentes principales y obtención de los ejes del elipsoide de variación (6.6.3).

En el terreno del análisis visual, también se han efectuado algunos ensayos para identificar la composición de color que ofrece una mejor discriminación de cubiertas. El proceso de trabajo parte de seleccionar intérpretes con distintos grados de experiencia, y cuantificar el número de cubiertas que discriminan adecuadamente en distintas composiciones de color (Benson y Degloria, 1984; Trolier y Philipson, 1986). En estos test, las combinaciones más puntuadas incluyen una banda del espectro visible, otra del infrarrojo cercano y otra del térmico. El orden habitual es aplicar el color rojo al infrarrojo cercano (TM4), el verde al infrarrojo medio (TM5) o al rojo (TM3), y el azul al rojo (TM3) o verde (TM2). Estos resultados son muy similares a los obtenidos por otros autores mediante técnicas estadísticas (Hord, 1986). A tenor de este resultado, el proyecto de cartografía de ocupación del suelo de España (dentro del programa europeo CORINE-Land Cover) ha seleccionado la composición TM 4/5/3 (IRC, IRM, R) como base para la interpretación visual de imágenes. Para objetivos parciales, puede ser interesante considerar otro tipo de combinaciones coloreadas. A partir de imágenes TM, se han comprobado la eficacia de la composición formada por las bandas 4/7/5, para detectar zonas quemadas, de la integrada por las bandas 7/4/3 para discriminación cultivos en regadío ó zonas encharcadas, y de la constituida por las bandas 7/3/1, para aplicaciones oceanográficas. Pese al interés de estas composiciones, sigue vigente el papel protagonista de la combinación en falso color tradicional (IR/R/V), puesto que es la única disponible en la mayor parte de los sensores de interés medio ambiental, además de garantizar una buena discriminación de las cubiertas vegetales.

Independientemente de las bandas que se incluyan en la composición, conviene considerar algunos aspectos sobre el proceso que permite obtener esas composiciones en color. Hasta aquí hemos indicado que se



(a) Proceso Aditivo (b) Proceso sustractivo

Fig. 5.8 - Procesos de formación del color

trata de aplicar a tres bandas del sensor cada uno de los colores elementales. La forma concreta de llevar a cabo esta combinación puede variar según el tipo de medio en el que queramos obtener el resultado.

Una composición en color puede conseguirse de acuerdo a dos procesos, denominados aditivo y sustractivo. En el proceso aditivo, cualquier color se obtiene por suma de los tres colores elementales: azul, verde y rojo. La suma de dos colores primarios permite lograr un color complementario: azul+verde, cian; azul+rojo, magenta, y verde+rojo, amarillo, mientras los tres suman el blanco (fig. 5.8a). Por el contrario, el proceso sustractivo se basa en la absorción de la luz que ejercen los colores complementarios: el cian absorbe la luz roja, el magenta absorbe el verde y el amarillo el azul. Los tres en combinación suponen, por tanto, el negro (fig. 5.8b).

El proceso aditivo es el utilizado en los sistemas electrónicos de visualización, cuando la imagen se representa en un monitor de rayos catódicos. Este es el proceso habitual en un equipo de tratamiento digital de imágenes. Por su parte, el proceso sustractivo se emplea en la reproducción mecánica del color, típica de las artes gráficas. Por tanto, cuando se pretenda imprimir una imagen resulta preciso aplicar a cada banda uno de los colores complementarios. Por ejemplo, para obtener una composición en falso color, debe aplicarse a las bandas del espectro IRC/R/V los colores complementarios amarillo, magenta y cian, respectivamente. Si, por el contrario, se requiere visualizar esa imagen sobre un monitor, el orden será rojo, verde y azul, para las mismas bandas.

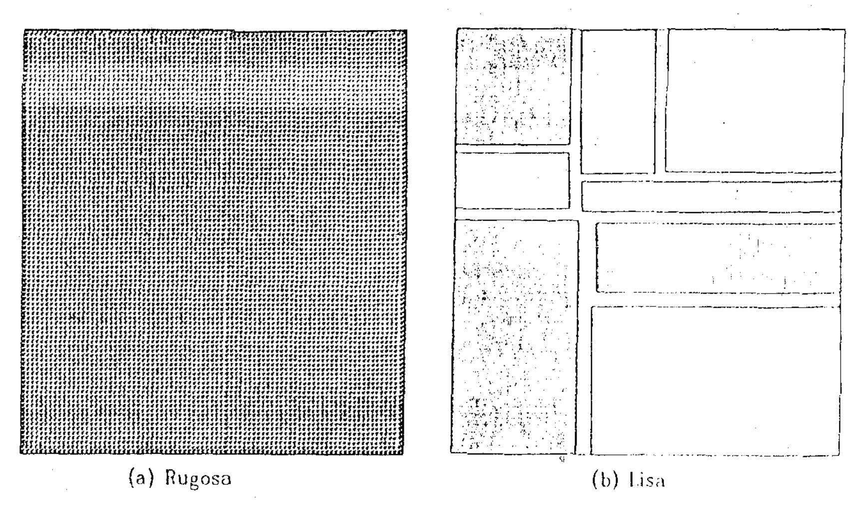
5.2.3. Textura

Esa cualidad se refiere a la aparente rugosidad o suavidad de una región de la imagen; en definitiva, al contraste espacial entre los elementos que la componen. La textura de la imagen procede de la relación entre el tamaño de los objetos y la resolución del sensor. Cuando un objeto ocupa una superficie inferior a 1 mm² en la imagen no puede identificarse individualmente, sino sólo a través de la variabilidad espacial que provoca. De esta forma, en función del tamaño de los objetos se distingue:

(i) textura grosera, cuando los objetos están comprendidos entre 0.25 y 1 mm² a la escala de la imagen,
(ii) textura media, objetos comprendidos entre 0,04 y 0.25 mm², y
(iii) textura fina, objetos inferiores a 0,04 mm².

En sentido estricto, además del tamaño de los objetos la textura está también influida por el ángulo de observación y de iluminación. Estos elementos son especialmente importantes en superficies rugosas, como es el caso del bosque natural, que ofrece una textura muy variada a lo largo del año, en función de las condiciones de adquisición.

En cualquier caso, el criterio de textura es muy importante para discriminar determinadas cubiertas que pueden ofrecer un comportamiento espectral uniforme (fig. 5.9). Por ejemplo, los frutales en regadío



(a) Rugosa (b) Lisa

Fig. 5.9 - Diagramas de textura

y las caducifolias ofrecen una reflectividad muy similar, por cuanto, en muchas ocasiones, presentan grandes afinidades fisiológicas. De esta forma, el criterio de textura puede ser el único viable para distinguirlas. Los frutales ofrecen un marco de plantación regular, mientras los árboles de hoja caduca aparecen con un desarrollo mucho más heterogéneo. En consecuencia, los frutales presentan una textura más fina, facilitando al intérprete la separación frente a especies forestales naturales (Gordon y Philipson, 1986).

5.2.4. Situación espacial

Por situación o contexto espacial se quiere indicar la localización de las cubiertas de interés, así como su relación con elementos vecinos de la imagen.

Un buen ejemplo del empleo de este criterio de interpretación hace referencia, de nuevo, del mundo urbano. Un jardín situado en el interior de la ciudad y formado por especies caducifolias, tiende a presentar un tono, un color y una textura muy similares a los que puede ofrecer un bosque natural de caducifolios. La confusión se debe a que ambas cubiertas están formadas por las mismas o similares especies, incluso con densidades y heterogeneidad (textura) muy parejas. En esa situación, no cabe más criterio para separarlas que ponerlas en relación con el entorno geográfico: aquellas que aparezcan en el interior de una superficie edificada, más o menos densa, pueden considerarse como parques urbanos, mientras las que se sitúen en un contexto de vegetación natural serán asignadas a bosques de frondosas. En similares términos cabe expresarse en lo que se refiere a la separación entre árboles de ribera y especies caducifolias, ya que las primeras pueden asociarse -como su nombre indica- con cursos fluviales.

Estas distinciones, tan importantes desde el punto de vista de la cartografía temática, sólo son abordables mediante interpretación visual, puesto que la clasificación digital no considera el contexto geográfico, al ser muy complejo de definir en términos numéricos.

5.2.5. Período de adquisición

La mayor parte de los especialistas están de acuerdo en que la observación sistemática de la superficie terrestre es una de las principales ventajas de la teledetección desde el espacio. Las características orbitales

del satélite permiten que las imágenes sean adquiridas periódicamente y en condiciones similares de observación, facilitándose así cualquier estudio que requiera una dimensión temporal.

Hasta el momento presente, este análisis multi-temporal se ha abordado con una doble orientación (Chuvieco, 1986; fig. 5.10):

(i) Por un lado, con objeto de detectar cambios entre dos fechas de referencia, deduciendo de ahí la evolución del medio natural o las repercusiones de la acción humana sobre ese medio, y planeando, en consecuencia, las medidas adecuadas para evitar su deterioro o asegurar su mejor conservación. Este enfoque podría denominarse multi-anual, por cuanto se utiliza el factor tiempo para seguir la evolución de una zona en un período relativamente dilatado.

(ii) Por otro lado, podríamos hablar de un enfoque multi-estacional, en donde la dimensión tiempo se utiliza para perfeccionar la interpretación de la imagen, gracias a incorporar información sobre el ciclo estacional de las cubiertas vegetales.

Independientemente del tipo de enfoque que pretenda seguirse, cualquier estudio multi-temporal implica una labor previa de corrección, con objeto de combinar adecuadamente las dos o más imágenes que van a intervenir en el análisis. En este sentido, conviene considerar que todas ellas deben registrarse geométricamente con la debida precisión, poseer una radiometría equiparable y estar libres de los aportes atmosféricos, muy variables entre fechas (2.8). La mayor parte de estos problemas pueden subsanarse gracias a técnicas digitales (6.5.2.3 y 6.5.3). La inter-

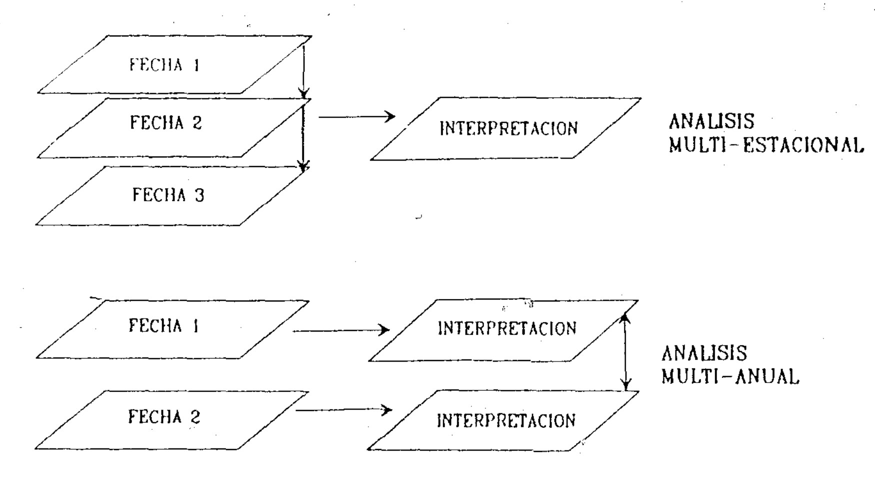


Fig. 5.10 - Dimensiones temporales en la interpretación de imágenes

pretación visual requiere menos precisión en los ajustes radiométricos y geométricos que la digital. Normalmente, los centros de distribución de imágenes incluyen una serie de realces y correcciones estándar, que bastan para un análisis visual comparativo entre ambas. Conviene tener en cuenta que los tonos/color/textura están en relación con las condiciones medio-ambientales y de adquisición, por lo que no han de considerarse en sentido absoluto; esto es, resulta recomendable aplicar esos criterios a la discriminación de cubiertas en cada imagen y no al conjunto de las diferentes fechas que intervengan en el proyecto.

Con estas salvedades, el factor multi-temporal representa un criterio de identificación muy importante en análisis visual, tanto en enfoques multi-anuales (Eyton, 1983; Crapper y Hynson, 1983; Renz, 1985), como multi-estacionales (Hilwig, 1980; Bronsveid y Luderus, 1982; Chuvieco, 1986; Chuvieco y Martínez, 1990).

Algunos estudios multi-temporales se han basado en técnicas de composición de color para realzar cambios entre dos fechas de referencia. Este es el caso de un trabajo dirigido a detectar espacios forestales sometidos a plagas de defoliación en Canadá, en donde se aplicó cada uno de los tres colores elementales a las bandas infrarrojo cercano y rojo de las dos fechas de referencia (Hall et al, 1984).

5.2.6. Otros criterios de análisis

Los criterios arriba comentados son los más importantes para el análisis visual de la imagen. No obstante, en algún caso puede ser conveniente enriquecer la interpretación apoyándose en otros aspectos secundarios. Algunos de estos rasgos son:

(i) Sombras, muy dependientes de la fecha de adquisición de la imagen y del relieve local. Permiten realzar la interpretación de los rasgos geomorfológicos, y de la textura de la imagen, especialmente en zonas forestales.

(ii) Patrón espacial. Este concepto indica una organización peculiar de individuos dentro de la imagen. El criterio se emplea mucho en fotografía aérea (por ejemplo, para distinguir un olivar -en plantación regular- de una dehesa), pero en imágenes de satélite está bastante limitado como consecuencia de la baja resolución del sensor.

(iii) Contorno. Facilita el reconocimiento de algunos rasgos particulares, como es el caso de las carreteras frente al ferrocarril (de trazado menos sinuoso), o de los ríos frente a los canales artificiales.

(iv) Formas. Permite reconocer elementos individuales en la imagen, como es el caso de complejos industriales o aeropuertos, y de estructuras geológicas bien definidas: volcanes, domos, o lineamientos.

(v) Visión estereoscópica. Resulta fundamental para el reconocimiento geomorfológico y de cubiertas del suelo, pues aporta una visión tridimensional del espacio observado. Como ya hemos señalado, la mayor parte de los sensores espaciales no poseen esta capacidad. Excepción a esta norma son las imágenes adquiridas por sensores fotográficos (3.3.1) y por el satélite SPOT (3.5.2). En el resto, sólo puede obtenerse visión estereoscópica en las zonas de solape entre órbitas, restringiendo este criterio a una estrecha banda lateral del conjunto de la escena. Probablemente, la lista se amplíe en un futuro inmediato si pasa a un plano central la elaboración de cartografía básica a partir de sensores espaciales.

5.3. ELEMENTOS DE ANÁLISIS VISUAL

Tras el repaso de los criterios sobre los que se basa la interpretación visual de imágenes, nos centramos en una serie de elementos a considerar para cualquier trabajo práctico a partir de este tipo de información.

5.3.1. Características geométricas de una imagen espacial

Una imagen adquirida desde el espacio presenta menos errores que una fotografía aérea, como consecuencia de la mayor estabilidad y altura de vuelo de la plataforma. Esto no quiere decir que estas imágenes estén libres de errores geométricos, y que puedan superponerse directamente sobre la cartografía básica.

Un pequeño ejercicio puede ayudar a valorar la magnitud de estos desajustes. Basta tomar un transparente y delinear los embalses y ríos que aparecen recogidos en la figura 5.4b, correspondiente a un fragmento del mapa nacional a escala 1:1.000.000. Posteriormente, puede superponerse ese transparente sobre la imagen aneja (fig. 5.4a), que recoge la misma superficie que la anterior y a similar escala. ¿Qué errores se observan?, ¿coincide la orientación geográfica en las dos figuras?, ¿a qué puede achacarse ese desequilibrio?

Mas adelante trataremos de los procesos que se aplican a la corrección de estos errores geométricos (6.5.3). Basta aquí apuntar que ese desajuste está originado por tres factores: (i) por errores, propiamente dichos, en la adquisición de la imagen, (ii) por la deformación que cualquier mapa

implica de la superficie terrestre, y (iii) por errores debidos a la generalización cartográfica en el mapa elegido aquí como referencia.

No obstante estos problemas, parece claro que una imagen de satélite puede servir para actualizar aspectos planimétricos de la cartografía, sobre todo a escalas pequeñas (menores a 1:100.000), gracias a su cobertura periódica y sistemática. Por ejemplo, en la cartografía referida, las áreas urbanas ofrecen una peor delimitación, por cuanto su dinamismo supera el ritmo de actualización de nuestra cartografía.

5.3.2. Efecto de la resolución espacial en el análisis visual

Antes se indicó que la resolución espacial hace referencia al tamaño de la mínima unidad discriminable sobre la imagen. Este concepto, en análisis visual, se relaciona tanto con el tamaño del pixel, como con la escala a la cual se representa la imagen.

La resolución espacial tiene una repercusión importante sobre la interpretabilidad de la escena. De entrada, aquellos elementos por debajo del tamaño del pixel no serán discriminables en la imagen, lo que supone un elemento fundamental en la selección del sensor más conveniente para cada objetivo. Cuanto mayor sea la resolución, mejor podrá definirse un pixel, ya que será más susceptible de albergar una sola cubierta. Por el contrario, si el tamaño del pixel es grande, la señal detectada resulta frecuentemente de varios tipos de cubierta, haciendo mucho más compleja su identificación.

El efecto de la resolución espacial sobre la calidad final de la imagen se pone de manifiesto en el análisis de las figuras 5.11a y b. Corresponden a dos imágenes adquiridas por los sensores MSS y TM sobre la ciudad de Madrid. Ambas están representadas a una escala similar y corresponden a la misma región del espectro (rojo). El análisis de ambas imágenes permitirá comprobar el impacto de la resolución espacial sobre su interpretación[1]. Se sugiere realizar unos transparentes sobre la red hidrográfica, autovías nacionales, estructura urbana, aeropuertos (Barajas, Torrejón, Cuatro Vientos), y puntos de referencia urbana: parques y jardines, Hipódromo, Palacio Real, etc. Todos estos elementos son claramente identificables sobre la imagen TM y muy complejos sobre la

[1] Recuérdese que el MSS ofrece una resolución espectral de 79 x 79 m, mientras la adquirida por el TM facilita un detalle espacial de 30 x 30 m.

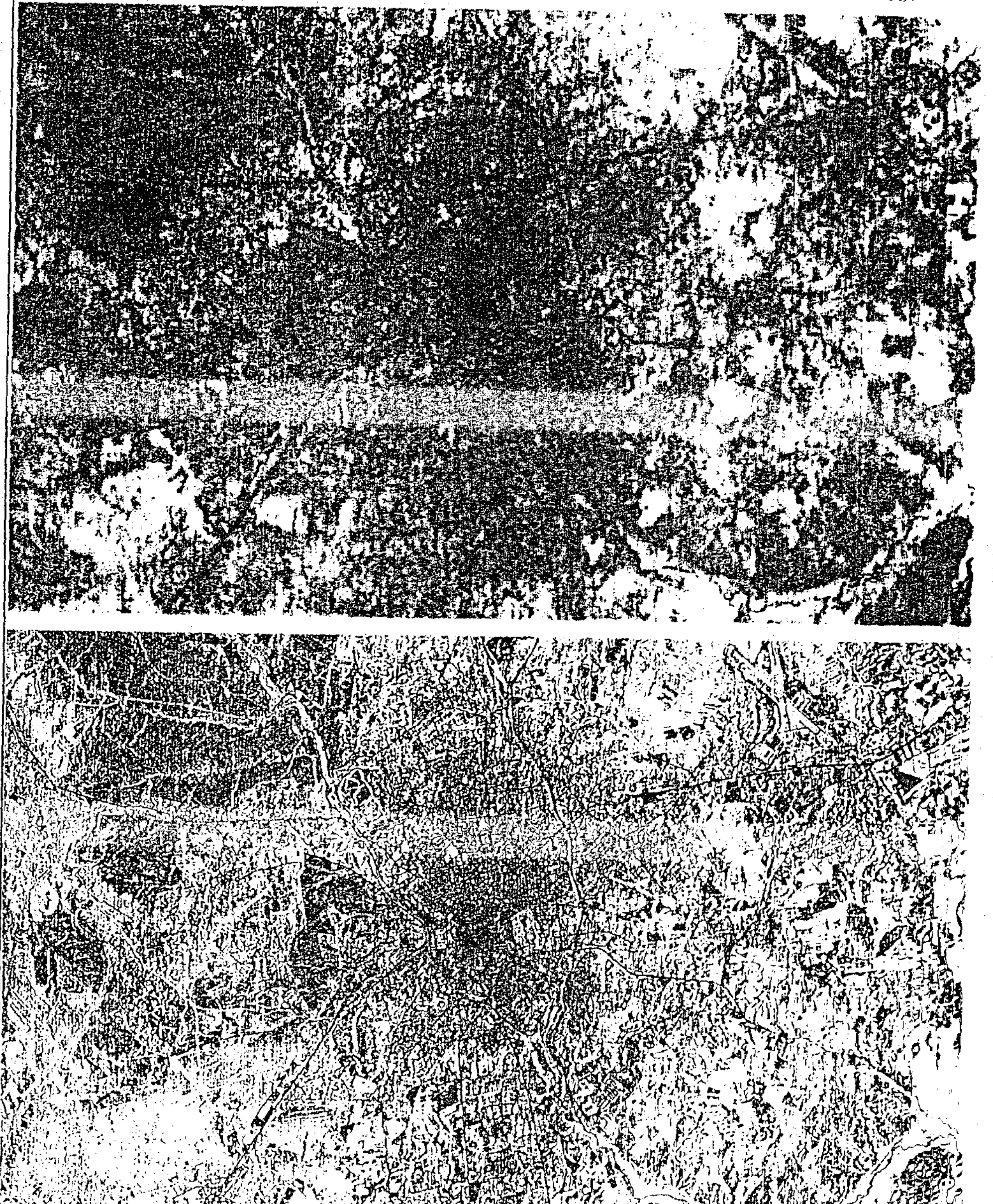


Fig. 5.11 - Efectos de la resolución espacial sobre la interpretación de imágenes: adquisiciones MSS y TM sobre la ciudad de Madrid

obtenida por el MSS, pues todos ellos están influidos por la diferente resolución espacial que brindan estos sensores.

5.3.3. Efecto de la resolución espectral en el análisis visual

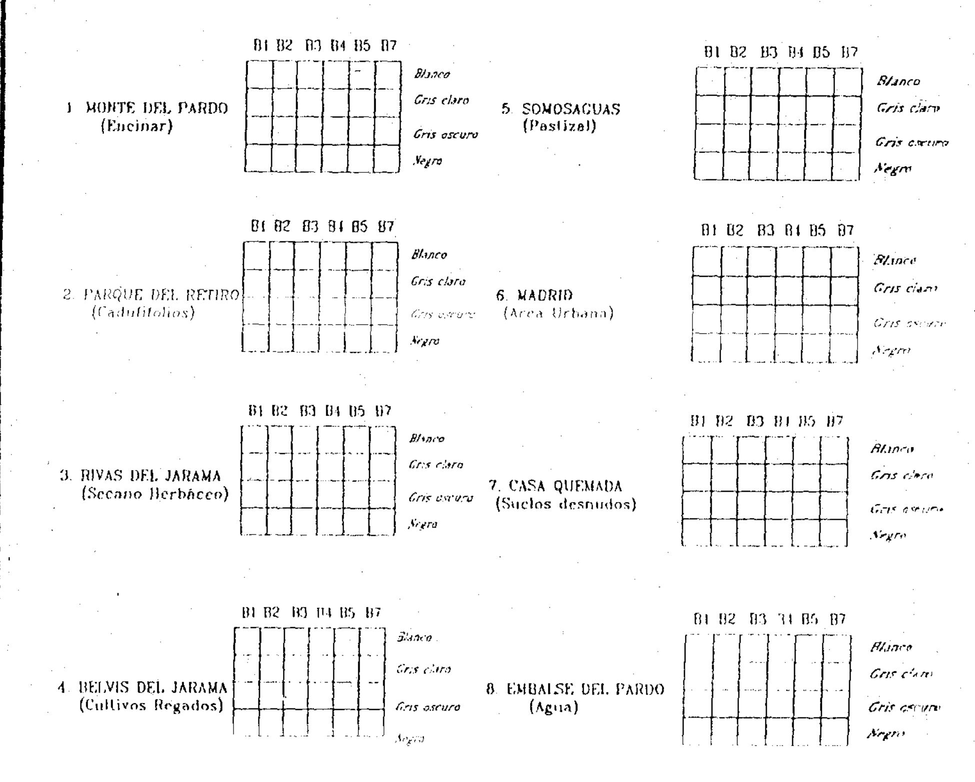
El carácter multi-espectral de las imágenes espaciales resulta básico de cara a su interpretación. La posibilidad de observar un fenómeno en diversas bandas del espectro amplía notablemente nuestra capacidad de reconocerlo. Como vimos anteriormente (2.5.1), cada cubierta ofrece un comportamiento espectral tipo, en función de las características de sus componentes, que denominamos signatura espectral. Allí se indicaba que ese comportamiento tipo se modifica por una serie de factores externos al sistema cubierta-sensor, estableciéndose una cierta variabilidad espectral en torno a ese comportamiento genérico.

En cualquier caso, el conocimiento de esos rasgos espectrales resulta muy interesante para proceder a una interpretación más razonada de la imagen. Un intérprete puede acostumbrarse a observar las masas vegetales con tonos oscuros en las bandas visibles y claros en el infrarrojo cercano, sin considerar los factores que inciden en ese fenómeno (2.5.2). No cabe duda que si éstos se tienen presentes en la interpretación de la imagen, resulta más fácil adaptarlos a zonas o categorías peor conocidas, convirtiendo la teledetección en una técnica aplicable a contextos más amplios.

No quiere esto decir que los tonos de gris sean una traducción estricta de las curvas de reflectividad previamente analizadas. Son, más bien, una traducción de los valores numéricos almacenados por el sensor, consecuencia, a su vez, de esa reflectividad, pero no identificables con ella, ya que cuentan también los valores de calibración del sensor y los efectos atmosféricos (6.5.2.4).

En cualquier caso, puede resultar interesante hacer un pequeño ejercicio de caracterización espectral de distintas cubiertas a partir del análisis visual. El ejercicio propuesto -que se adapta de uno similar ideado por Short (1982)-, pretende que el lector complete la información incluida en la tabla 5.1, a partir de los tonos de gris que observe en las distintas bandas espectrales incluidas en la figura 5.12. Se trata de las seis bandas ópticas del sensor *Thematic Mapper*, correspondientes a una adquisición realizada por el satélite Landsat-5 en agosto de 1984. Recoge la mayor parte del área metropolitana de Madrid y alrededores. Con objeto de facilitar la búsqueda de espacios que definan cada uno de los

Tabla 5.1
Caracterización espectral de distintos tipos de cubierta

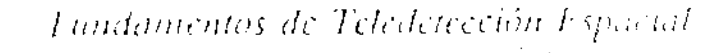


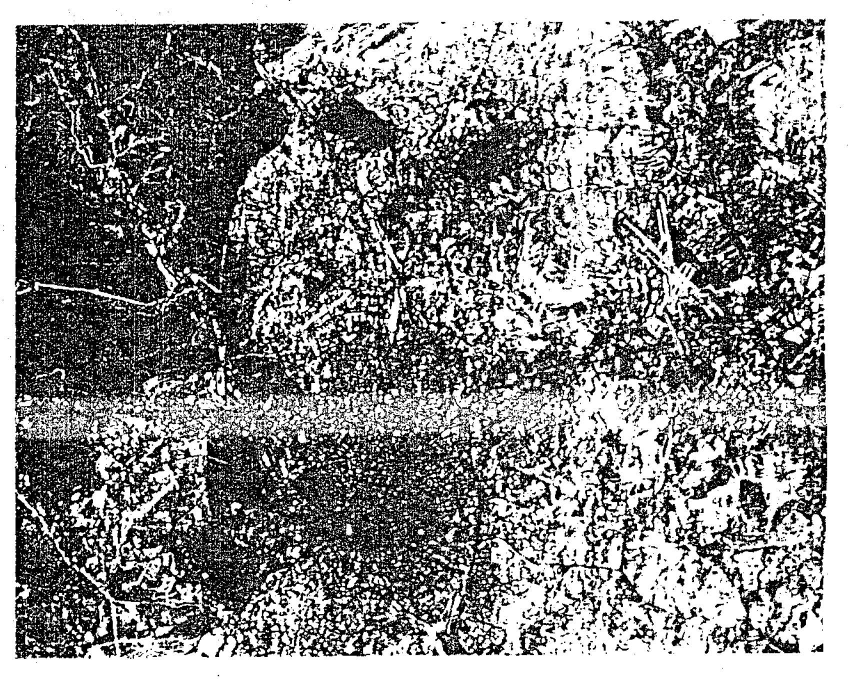
tipos de cubierta, puede consultarse la cartografía disponible sobre este sector, si bien se indican, en la primera banda, algunos puntos que pueden ayudar en dicha identificación. A partir de ahí, el intérprete puede analizar los rasgos espectrales de dichas cubiertas en el resto de las bandas consideradas.

Una vez completado ese cuadro, será posible responder a las siguientes preguntas: ¿es posible distinguir entre perennifolias y caducifolias?, ¿en qué bandas?, ¿qué base física tiene esa distinción? ¿Qué banda es más idónea para cartografiar los cultivos regados?, ¿por qué?, ¿se mantendría en otra fecha del año esa separación? ¿Qué banda indica mejor las redes de transporte?, ¿es posible distinguir los límites de la ciudad?, ¿pueden discriminarse las áreas residenciales periféricas?


8
1
7
4
6
8
5
3









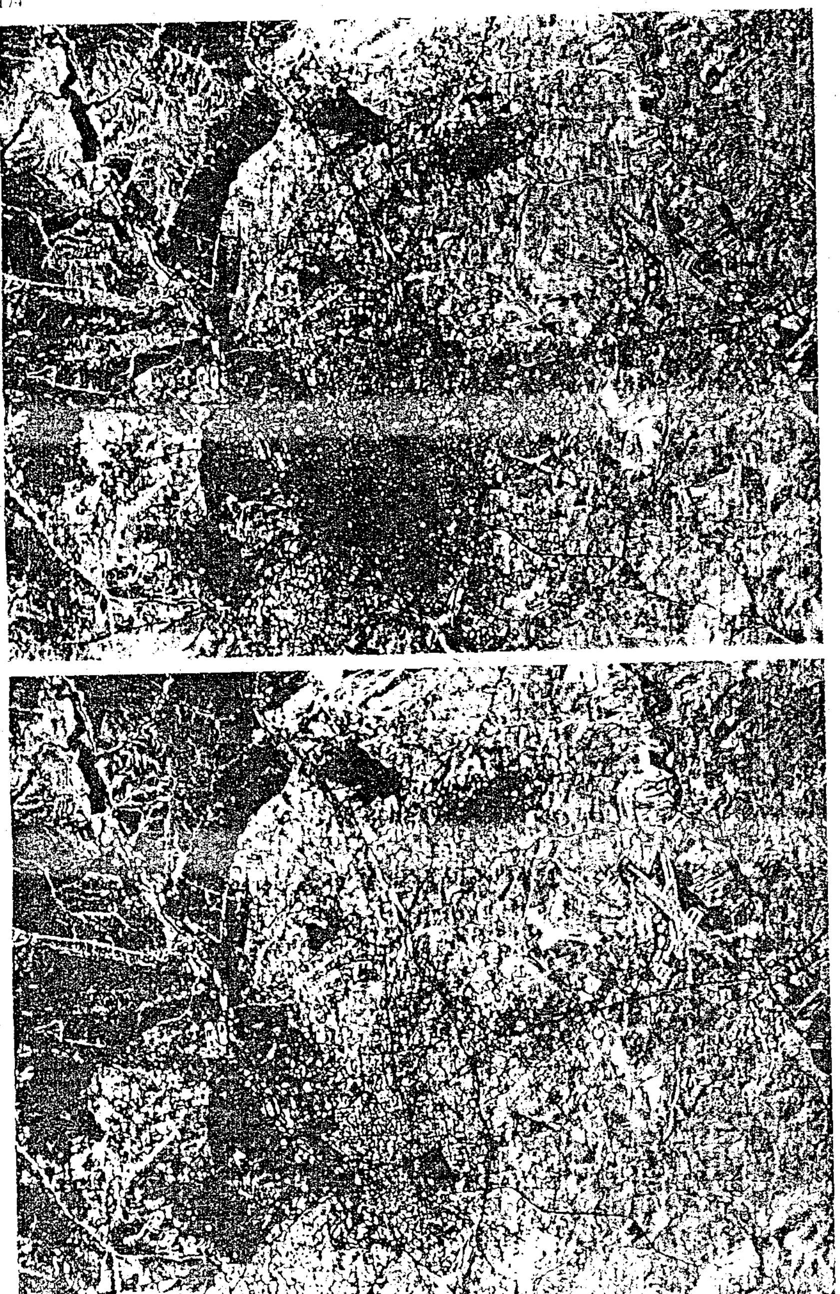


Fig. 5.12 - (e) Banda 5 y (f) Banda 7

5.3.4. Interpretación de composiciones en color

A partir de este ejercicio y de la teoría del color previamente comentada, resultará más sencillo interpretar combinaciones multi-banda. Basta tener en cuenta que el proceso aditivo implica los pixels tendrán tanto más intensidad de un determinado color cuanto más blancos aparezcan en la banda a la que se aplique ese color. Si optamos, por ejemplo, por una composición en falso color (banda 2, azul, banda 3, verde, y banda 4, rojo), un pixel aparecerá rojo cuanto mayor intensidad presente en la banda 4 y menor en las dos restantes. Este es el caso de las zonas cubiertas por especies caducifolias, que ofrecen un tono claro en la banda 4, oscuro en la 3 y medio en la 2, por lo que tienden a teñirse con un color rojo o rojo-magenta. Por el contrario, un embalse que aparece oscuro en la banda 2 y negro en las restantes, tenderá a aparecer azul oscuro, ya que cuenta con un débil componente de azul y casi nulo de verde y rojo.

Siguiendo este razonamiento, el lector puede contestar a las siguientes preguntas: ¿en qué color aparecerán los perennifolios y las zonas urbanas?, ¿qué combinación de color se requiere para que la vegetación aparezca en verde (consultar figura 5.8)? En esa nueva combinación, ¿cómo aparecerían las zonas urbanas, el agua y los perennifolios?, ¿qué asignación de colores complementarios se requeriría para lograr las mismas tonalidades?

La imagen correspondiente a la figura 5.13* puede servir para familiarizar al lector con este tipo de composiciones coloreadas. Se trata de una composición en falso color correspondiente a un cuarto de escena de una imagen TM, adquirida en agosto de 1984. Se localiza en el cuadrante Nororiental de la Comunidad Autónoma de Madrid y Occidental de Guadalajara. El importante contraste topográfico y la presencia de una gran ciudad como Madrid, conlleva una notable variedad de tipos de ocupación del suelo. En consecuencia, resulta idónea para realizar algunas reflexiones que ilustren sobre los criterios de interpretación arriba indicados. Para los lectores no familiarizados con el área de estudio, puede ser conveniente acudir a una cartografía a media escala, con objeto de situar los rasgos geográficos relevantes: embalses, ciudades más destacadas, unidades geomorfológicas, etc. Tras ello, pueden abordarse los siguientes ejercicios:

(i) Identificar tono y textura de las siguientes cubiertas: cultivos herbáceos de secano, cultivos leñosos de secano, cultivos de regadío, frondosas perennifolias, frondosas marcescentes, frondosas caducifolias, coníferas, áreas residenciales, zonas urbanas densas, agua.

(ii) Con ayuda de un transparente, recorrer cada una de las carreteras principales de la imagen. Anotar qué tipo de coberturas atraviesan desde su salida de la ciudad.

(iii) Delimitar todos los parques y jardines reconocibles sobre la imagen. ¿En qué sectores de la ciudad son más dominantes? Comentar su localización en relación con la actividad industrial y residencial de la ciudad.

(iv) Localizar las principales áreas de segunda residencia que aparecen en la imagen. Ponerlas en relación con la vegetación próxima, morfología, accesibilidad y clima. ¿Cuál de estos factores es dominante?

(v) ¿Puede establecerse una gradación de tipos de vegetación en función de la altitud? ¿qué tipo de especies aparecen en: -pie de monte, -escalón inferior, -escalón superior, -cumbre. ¿Pueden detectarse estas gradaciones sobre la imagen?, ¿por qué?

5.3.5. Ejercicios de análisis multi-temporal

No conviene terminar este repaso de las posibilidades que ofrece el análisis visual sin mostrar las aportaciones del factor tiempo. Para el caso de los satélites Landsat, podemos contar con una imagen cada 16 días, adquirida en condiciones de observación muy similares y a la misma hora local. De no impedirlo la cobertura nubosa, que lógicamente disminuye esta disponibilidad, puede contarse con una amplia serie de imágenes de la misma zona, facilitando el seguimiento de su dinamismo.

Ya hemos comentado que este factor temporal puede abordarse con un doble objetivo: por un lado, la mejora en la interpretabilidad de la imagen; por otro, la detección de cambios.

El primer aspecto supone utilizar la dimensión temporal para mejorar la interpretación de la imagen, al aportar un valioso informe sobre el desarrollo fenológico de las especies vegetales. El interés de utilizar este criterio puede quedar de manifiesto tras el análisis de la figura 5.14*, que corresponde a una imagen TM adquirida en el mes de mayo sobre la misma zona incluida en la figura 5.13*. Por comparación de ambas figuras se observará el dinamismo estacional de algunas cubiertas vegetales, principalmente de los cultivos herbáceos, que muestran un claro vigor vegetal en la imagen de mayo, mientras en la de agosto se muestra el suelo ya recolectado. En similares términos cabe expresarse respecto a los pastizales de pie de monte, situados al noroeste de la ciudad de Madrid, que ofrecen unos tonos rojos en esta adquisición frente a los ocres de la imagen de verano.

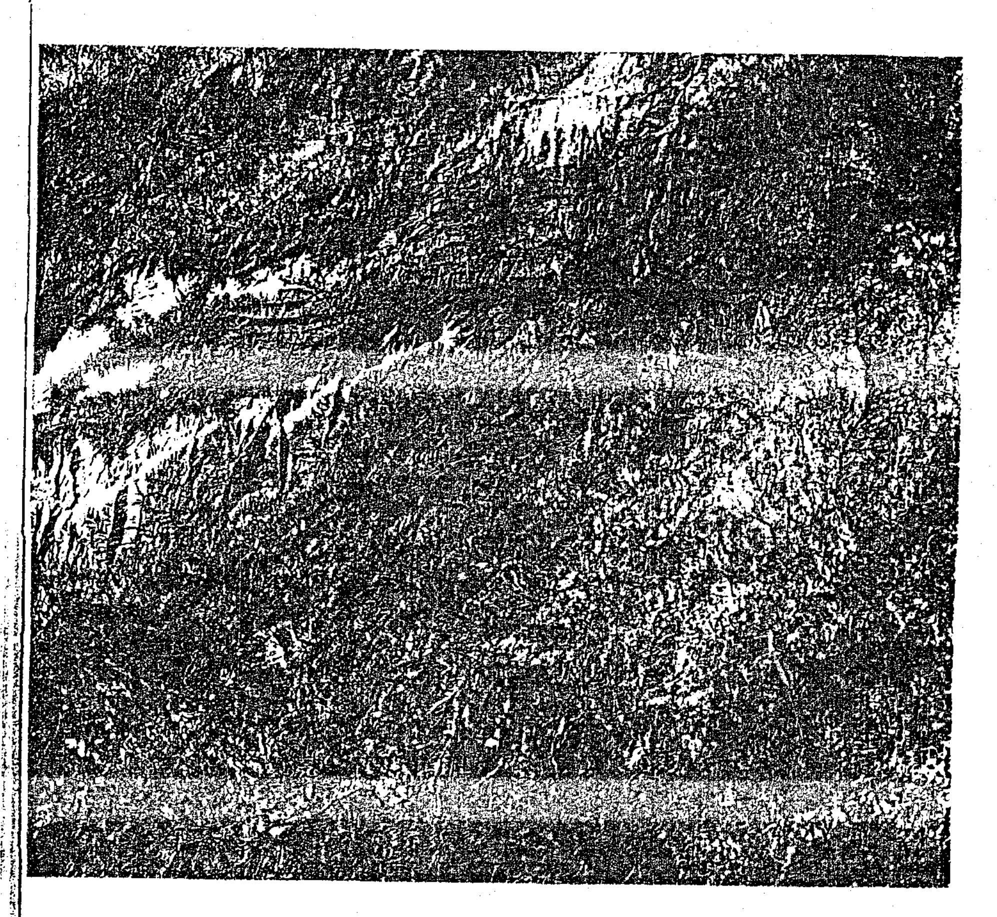


Fig. 5.15a - Dimensión multi-estacional en la interpretación de imágenes: adquisición de enero

Un seguimiento estacional más completo se recoge en las figuras 5.15a-d, que presentan cuatro imágenes del sensor MSS correspondientes a las cuatro estaciones del año. Se recoge la misma superficie a la imagen ya comentada en la figura 5.4, un sector de unos 25.000 km² correspondiente a la región centro, al Suroeste de Madrid. Con esta secuencia temporal, se pretende mostrar el dinamismo estacional de las principales cubiertas, por comparación de los tonos de gris que ofrecen las cuatro imágenes. Para facilitar esta comparación, todas las imágenes se refieren

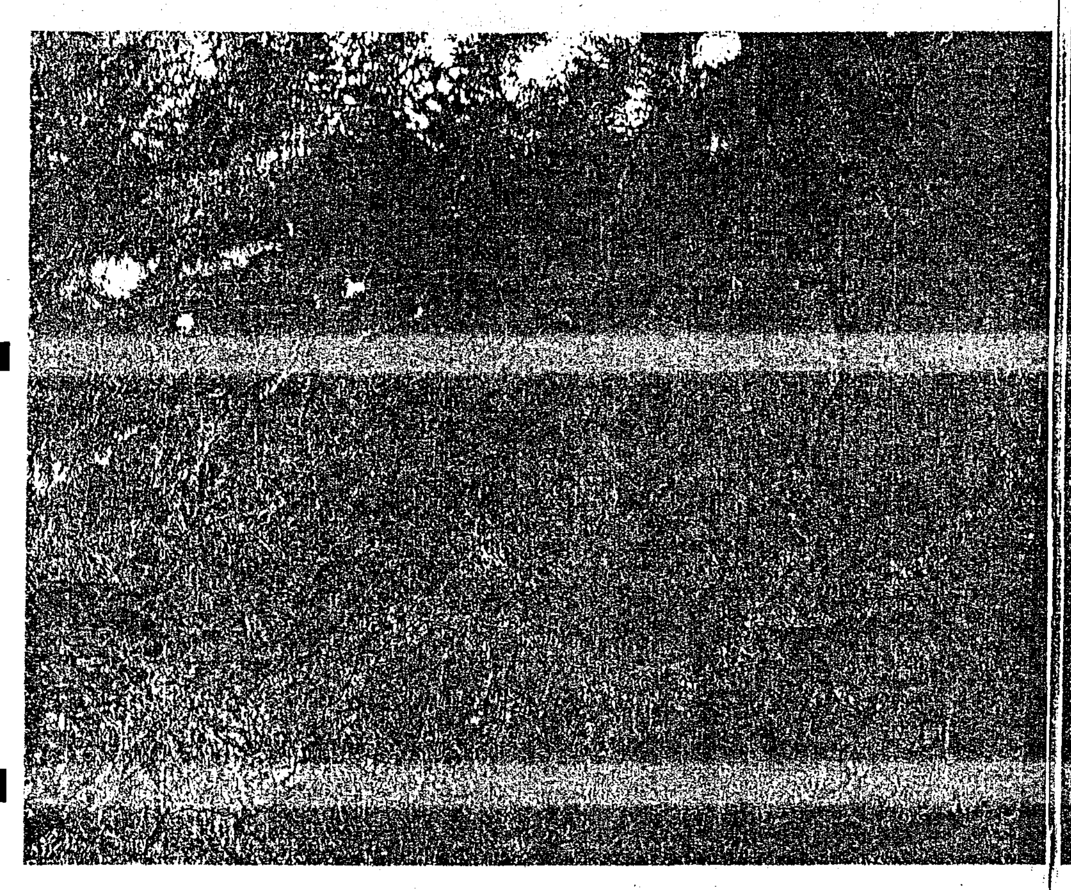


Fig. 5.15b - Adquisición de mayo

a la misma banda del espectro, concretamente al infrarrojo cercano (Banda 7).

Por comparación entre las cuatro imágenes, puede obtenerse una una valiosa experiencia para futuros trabajos que requieran hacer uso de la dimensión temporal. Entre los múltiples aspectos que pueden considerarse en este tipo de estudios multi-estacionales, la secuencia de imágenes que se presenta permite abordar los siguientes aspectos: (i) el seguimiento de la cobertura de nieve; (ii) el estado de ríos y embalses;

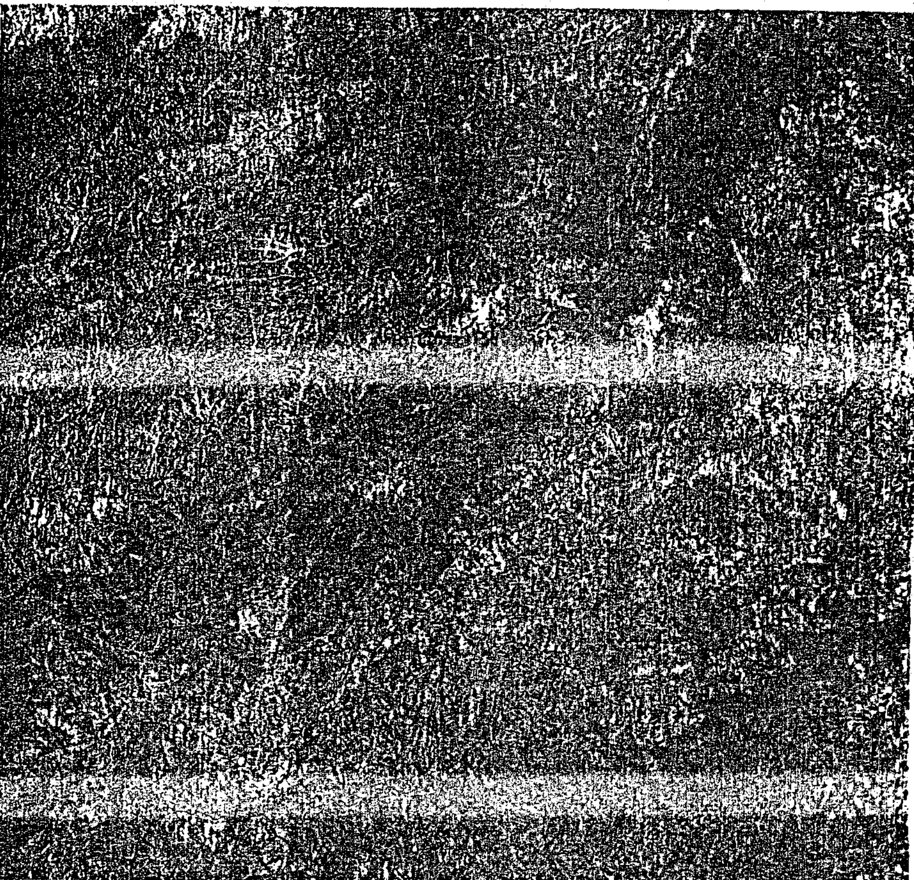


Fig. 5.15c - Adquisición de julio

(iii) aspectos geomorfológicos (lineamientos, divisorias de aguas); (iv estado de los cultivos; (v) dinámica de la vegetación natural.

En lo que se refiere al seguimiento de la cobertura de nieve, puede realizarse una cartografía diacrónica, comparando la extensión de esta cubierta a lo largo del año. A la vez, y en función del estado de la capa de nieve, pueden distinguirse distintos tipos de embalses, con una dinámica peculiar de acuerdo a su carácter. Por ejemplo, el embalse del Rosarito, al pie de la Sierra de Gredos, presenta un mínimo mucho más

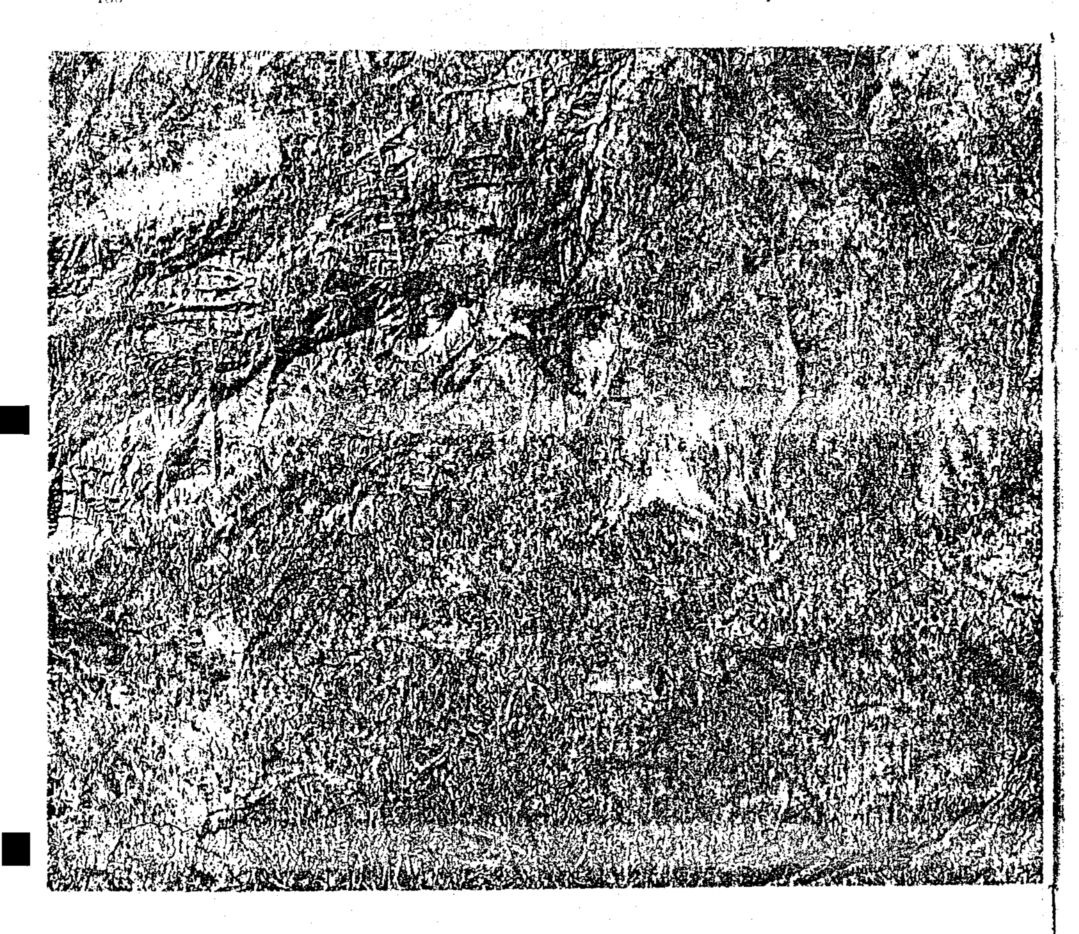


Fig. 5.15d - Adquisición de octubre

marcado en octubre que en mayo, frente a otros de regimen pluvial, como el de Cazalegas, que no presenta un contraste tan nítido.

En cuanto a la dinámica de los cultivos, la comparación entre las distintas estaciones permite diferenciar los cultivos regados, así como los anuales de los que presentan un aprovechamiento más extensivo. De igual forma, puede observarse la evolución de la vegetación natural en las distintas estaciones, particularmente en las especies de hoja caduca, y en los prados naturales.



Fig. 5.16a - Dimensión multi-anual en el tratamiento de imágenes: imagen RBV de la ciudad de Madrid (1980)

El segundo aprovechamiento del análisis multi-temporal se dirige estudiar el dinamismo temporal de una determinada zona: espacios urbanos, áreas de agricultura intensiva, comarcas sujetas a ordenación, etc. También nos permite evaluar la superficie afectada por fenómenos efímeros, como es el caso de las inundaciones o los incendios forestales, así como seguir la evolución de sus efectos.

Como muestra de las posibilidades de este enfoque del análisis multi-temporal, se presentan las figuras 5.16a y b, que permiten un seguimien-



Fig. 5.16b - Dimensión multi-anual en el tratamiento de imágenes: imagen TM de la misma zona (1984)

to de los cambios en la ciudad de Madrid entre 1980 y 1984. Se trata de dos imágenes adquiridas por los sensores RBV y TM, respectivamente. La resolución espacial es pareja (40 y 30 m). No así la espectral, aunque la interpretación de los tonos de gris puede considerarse equivalente. En cualquier caso, nos permiten detectar algunos cambios en el núcleo urbano entre las fechas de referencia. Un examen atento de ambas permitirá distinguir los siguientes aspectos: consolidación de la ciudad residencial Tres Cantos, extensión del Encinar de los Reyes, urbanización del límite meridional del monte del Pardo, construcción de Mercamadrid,

obras de conexión Arturo Soria a M-30, cambios en la nacional 602, autovía de Andalucía, etc.

5.4. APLICACIONES DEL ANÁLISIS VISUAL

Esta obra no se ha concebido para comentar las múltiples aplicaciones de la teledetección, sino sólo para presentar sus fundamentos. Pese a ello, parece oportuno esbozar, al menos, alguno campos de aplicación. Los temas que siguen no son exclusivos del análisis visual de imágenes, sino que pueden ser también abordados mediante tratamiento digital. No obstante se presentan aquí a modo de ejercicios, para que el lector compruebe las posibilidades de las imágenes que ilustran esta obra.

5.4.1. Cartografía geológica

A partir de imágenes espaciales, pueden detectarse rasgos geológicos de gran radio de cobertura. Un buen ejemplo, correspondiente a nuestro país, sería el abombamiento transversal del bloque meseteño descubierto por Alía y colaboradores a partir del análisis visual de imágenes Landsat (Alía et al, 1976). Junto a estos fenómenos de conjunto, merecen destacarse otros aspectos más parciales, como son la cartografía de lineamientos, el estudio de erupciones volcánicas, la localización de acuíferos o de yacimientos minerales, y el seguimiento de la dinámica fluvial.

De estos aspectos, la cartografía de alineaciones ha sido el más profusamente empleado en análisis visual. Por alineación o lineamiento se entiende cualquier "rasgo lineal, simple o compuesto, de una superficie, que difiere claramente de los rasgos adyacentes y previsiblemente refleja fenómenos del subsuelo" (O'Leary et al, 1976, citado por Moore y Waltz, 1983). Estos rasgos pueden reconocerse visualmente, a partir de la imagen original o, mejor aún, tras aplicarle alguna técnica de realce (6.6.6). Una vez reconocidos, pueden realizarse gráficos de frecuencia, indicando las direcciones dominantes, lo que nos permite ponerlos en relación con la estructura geológica de la zona.

Tomemos, como ejemplo, las cuatro imágenes que incluye la figura 5.15. A partir de ellas pueden dibujarse, con ayuda de un transparente, todos los lineamientos reconocibles sobre la imagen (fig. 5.17). Posteriormente, puede resultar de interés construir un histograma de frecuencias, de acuerdo a distintas orientaciones, lo que permitirá ilustrar la dirección

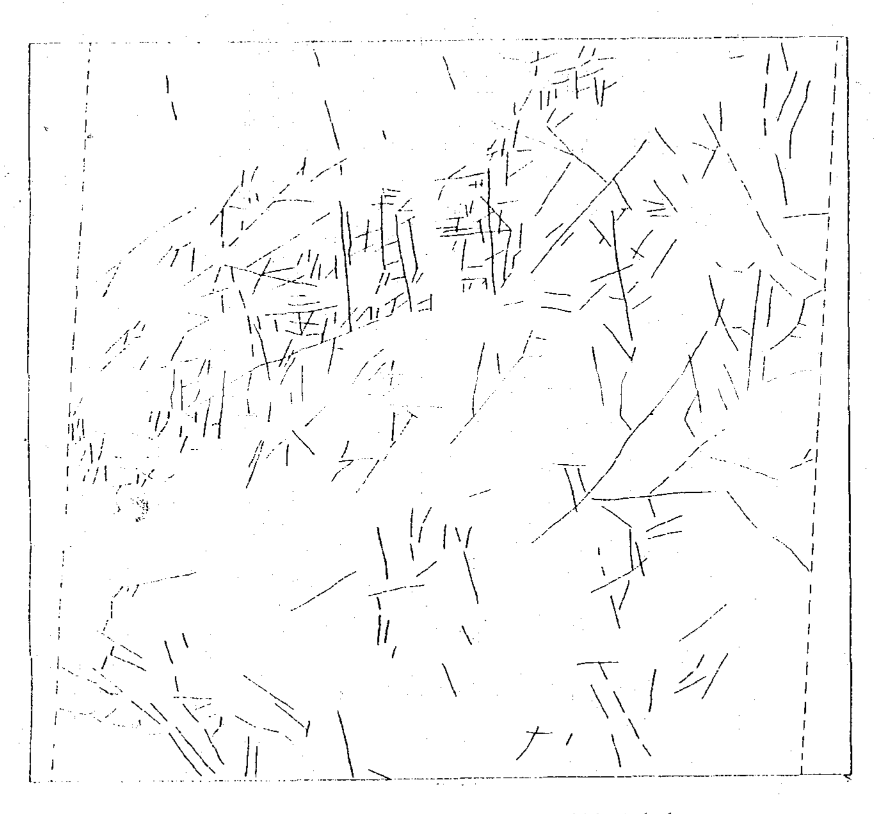


Fig. 5.17 - Mapa de lineamientos a partir de análisis de imágenes

principal de las estructuras locales. Basta luego poner en relación ese gráfico con la tectónica general de la zona[2], con objeto de inferir el sentido de dichas alineaciones.

Este ejercicio pasa por reflexionar, en primer lugar, sobre la estación y banda espectral más idónea para este tipo de cartografía. A partir del examen de esas cuatro imágenes, puede apreciarse como el otoño e invierno resultan más adecuadas, puesto que el efecto de sombreado realza notablemente cualquier contraste topográfico.

[2] Puede consultarse como referencia el Mapa Geológico Nacional a escala 1:1.000.000, así como la serie geológico de menor escala (1:200.000 y 1:50.000). Entre la bibliografía de referencia, basta acudir a Terán, Solé y otros: *Geografía General de España*, Ariel, Barcelona (varias ediciones).

Respecto a la banda del espectro, se recomienda utilizar la correspondiente al infrarrojo cercano (banda 7 en el sensor MSS), pues los lineamientos suelen asociarse con concentraciones de humedad, nítidamente visibles en esta región del espectro. Similares trabajos se han planteado por otros autores, tanto sobre imágenes Landsat (Short, 1982, pp. 118-131; Alia et al, 1976), como sobre imágenes rádar (Woldai, 1983; Calvet y Pascual, 1987).

5.4.2. Cobertura del suelo

Este término engloba un amplio rango de aplicaciones. Por cobertura del suelo entendemos el tipo de ocupación existente sobre él, ya sea ésta vegetación natural, ya cultivos agrícolas o espacios urbanos. Este tipo de cartografía resulta básica en la planificación del territorio, ya que resulta preciso conocer la dedicación actual del terreno para proponer cualquier mejora. Con las ideas vistas previamente (4.1), conviene organizar una leyenda coherente, a la zona y al propósito del estudio, que guíe los trabajos de interpretación visual.

Con estas ideas, el lector interesado puede ensayar una cartografía de la ocupación del suelo a partir de las imágenes en falso color que aparecen en las figuras 5.13* y 5.14*. Con ayuda de unos transparentes y de la leyenda de color recogida más arriba (5.2.2), se trata de ir delimitando manchas de color homogéneas, que luego pueden identificarse sobre cartografía de apoyo, fotografía aérea o trabajos de campo. Sería recomendable, al menos, discriminar las siguientes categorías: perennifolios, caducifolios, matorral, pastizales, zona urbana densa, zona urbana laxa, cultivos regados, cultivos de secano y láminas de agua. Puede utilizarse cartografía de apoyo a pequeña escala[3]

Este tipo de metodología se ha empleado en numerosos estudios. Las áreas temáticas más frecuentadas han sido la cartografía de especies forestales (Marx y Hildebrandt, 1978; Morain y Klankamsorn, 1978; Sadar et al, 1982), la estratificación fisiográfica (Hilwig, 1980; Astaras y Silleos, 1984; Nikolaus, 1988), y propiamente la cartografía de ocupación del suelo (Chicharro, 1976; Harnapp, 1978; Chuvieco, 1986; Martínez, 1989).

[3] Por ejemplo, el *Mapa de Formaciones Vegetales de la Comunidad de Madrid*, de la Comunidad de Madrid, o el *Mapa provincial de Cultivos y Aprovechamientos*, del Ministerio de Agricultura. Ambos están editados a escala 1:200.000.

Dada la variedad de coberturas que incluye, este tipo de estudios es idóneo para mostrar la versatilidad del análisis visual. Por ejemplo, en un trabajo de este tipo desarrollado sobre la zona centro (Chuvieco y Martínez, 1989), se emplearon en la interpretación los siguientes criterios: tono, color, tiempo, textura, y emplazamiento. El trabajo pretendía realizar una cartografía de la cobertura del suelo a escala 1:250.000 sobre las dos imágenes TM, de mayo y agosto, comentadas previamente. En el ensayo cartográfico se delimitaron catorce categorías: espacios urbanos densos, áreas residenciales, parques urbanos, herbáceos de secano, olivar-viñedo, cultivos de regadío, suelos no cultivados, bosques de caducifolias y de perennifolias, praderas, pastos y matorrales, superficie improductiva y agua. Algunas de estas categorías fueron claramente discriminables a partir de su coloración en la imagen de agosto, utilizada como referencia. Se trata del agua, bosques de perennifolios y matorral. Otras se delinearon tras comparar esta imagen con la de mayo: suelos no cultivados, zona urbana densa, praderas, olivar-viñedo. El resto, exigieron una conjunción de diversos criterios, por cuanto ofrecían un tinte similar en las dos imágenes. Estas fueron: caducifolios, cultivos regados, urbanizaciones residenciales y parques urbanos. En este punto, se puso en evidencia el interés de contar con otros criterios visuales de identificación (fig. 5.18). La textura permitió aislar las áreas residenciales, mucho más heterogéneas que el resto de las arriba indicadas. El contexto espacial permitió separar los parques urbanos, claramente identificables por su situación. Por último, la dimensión estacional facilitó la discriminación de los cultivos regados frente a los caducifolios, ya activos en la imagen de mayo.

5.4.3. Morfología urbana

Teniendo en cuenta la gran complejidad espacial del fenómeno urbano, en donde conviven actividades muy variadas sobre un reducido espacio, la aplicación de la teledetección espacial a estos ámbitos es reciente y aún limitada. El principal problema radica en la resolución espacial de los sensores espaciales, excesivamente groseros para aportar nueva información sobre el entramado urbano (Welch, 1982).

Pese a esto, contamos con algunos estudios de aplicación que permiten mejorar nuestra información sobre áreas remotas, en donde la cartografía disponible es inadecuada. Trabajos de este tipo son los emprendidos, a partir de interpretación visual, sobre Nigeria (Olorunfemi, 1987; Adeniyi, 1987) o China (Lo y Welch, 1977). Incluso en países más desarrollados, la cartografía de zonas urbanas ofrece importantes

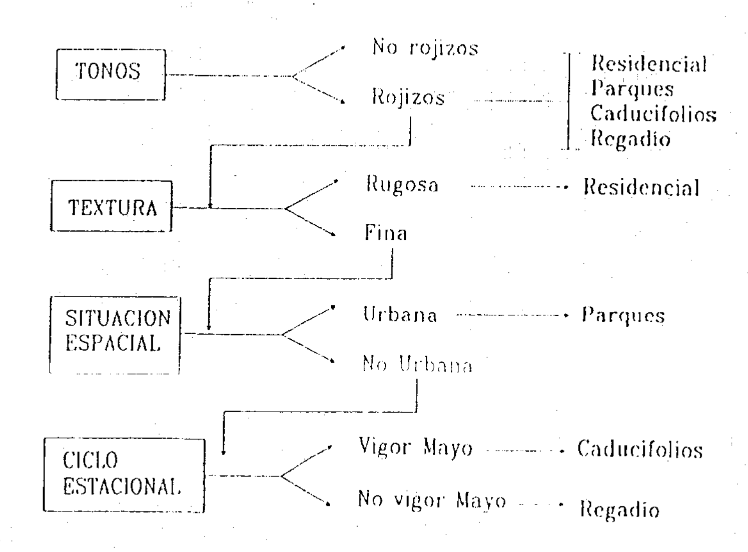
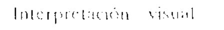


Fig. 5.18 - Criterios para la interpretación visual de imágenes

problemas de actualización, debido al dinamismo que normalmente ofrecen. La cobertura temporal de las imágenes espaciales estimula su empleo en tareas de actualización, ya sea de los límites censales (Dietrich y Lachowski, 1978), ya del espacio edificado (Carter y Stow, 1979; Welch, 1980). A partir de imágenes TM o SPOT, esta aplicación puede resultar cada vez más viable. Baste, como ejemplo, comparar las imágenes incluidas en la figura 5.16 con un mapa provincial de escala pareja (1:200.000). La comparación entre ambos documentos permite delimitar áreas de desarrollo urbano no incluidas en la cartografía convencional –necesariamente menos dinámica que la imagen de satélite–, mostrando una información global y actualizada del tejido urbano.

Un poco más refinado resultaría el análisis de la imagen para inferir rasgos de la morfología urbana. Los criterios empleados, en este caso, serían el tono, color y la textura. A partir del primero puede deducirse la densidad de edificación, por cuanto aquellas zonas que alberguen menor influencia del trazado viario ofrecerán un tinte más oscuro. Asimismo, el tono indica si la zona cuenta o no con espacios verdes, bien sea continuos (manchas uniformes), bien discontinuos (tinte rojo salpicado en medio de los azules propios de la edificación). En cuanto a la textura, indica el grado de mezcolanza propio de un determinado sector. A partir de estos dos criterios, puede ensayarse una delimitación



de sectores morfológicos dentro de la ciudad de Madrid (fig. 5.19*). Sería conveniente distinguir los siguientes sectores: centro histórico, ensanche (barrio de Salamanca), barrios de expansión no planificada (eje de Bravo Murillo), barrios residenciales (el Viso, Hispano América, Nueva España). De igual forma, pueden identificarse ejes viarios y espacios verdes continuos, y, en función de su anchura y tamaño, aportar más datos a esa caracterización morfológica. Ejercicios similares a éste se han desarrollado con un contexto docente (Chuvieco y Sancho, 1986; Casas y Chuvieco, 1987).

Fig. 3.19* - Imagen multi-espectral SPOT sobre el Estrecho

Fig. 3.21* - Imagen del globo terrestre adquirida por el satélite Meteosat

Fig. 3.20* - Imagen del sensor AVHRR-NOAA sobre el continente europeo (cortesía NRSC)

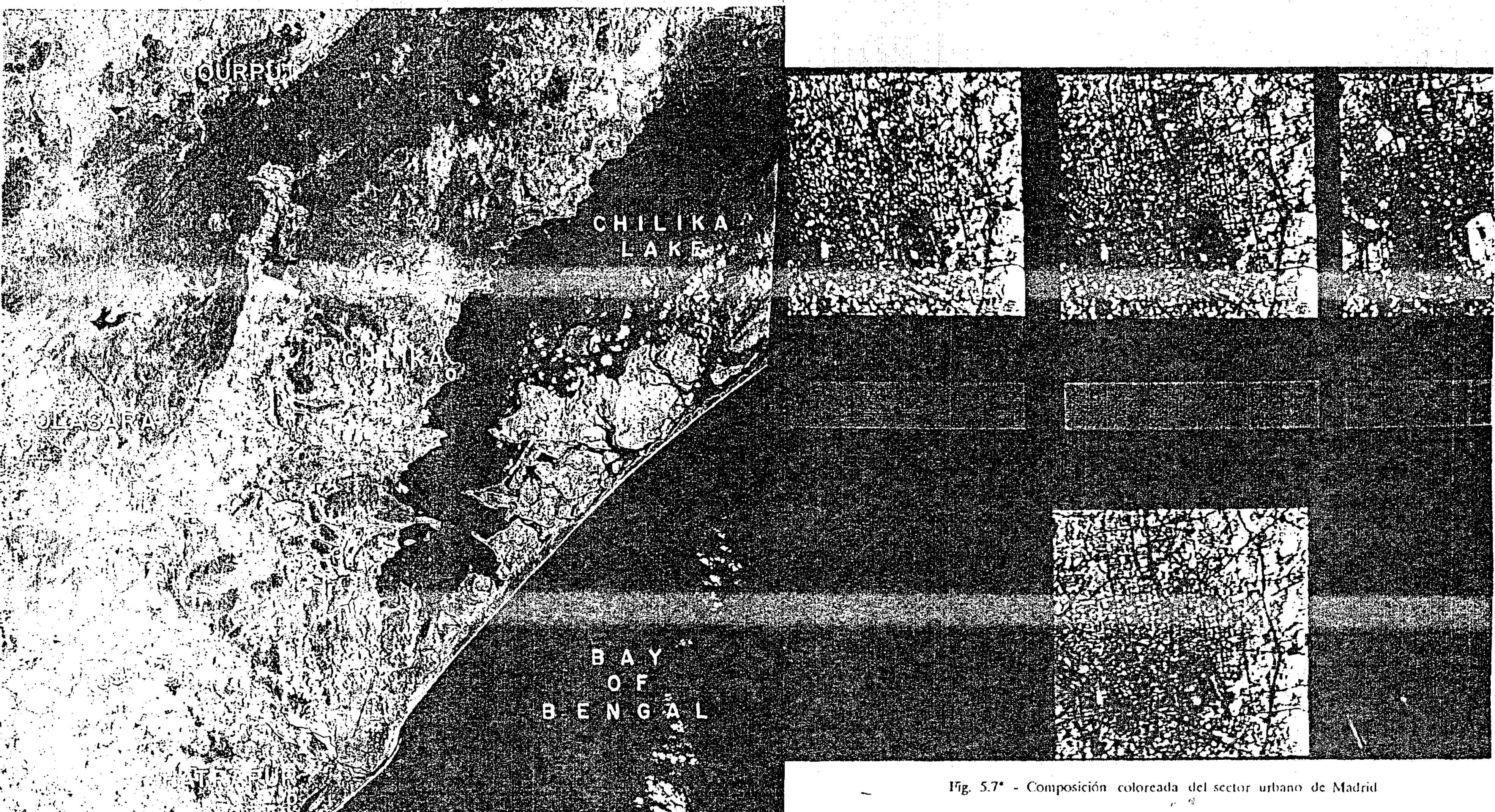


Fig. 5.7* - Composición coloreada del sector urbano de Madrid

Fig. 3.22* - Imagen del satélite indio IRS-1
(cortesía de la National Remote Sensing Agency, Hyderabad)

Fig. 5.13* - Imagen TM en Falso Color de la zona centro (agosto 1984)

Fig. 5.14* - Imagen TM en Falso Color de la zona centro (mayo 1985)

Fig. 5.19 * - Imagen TM del centro urbano de Madrid

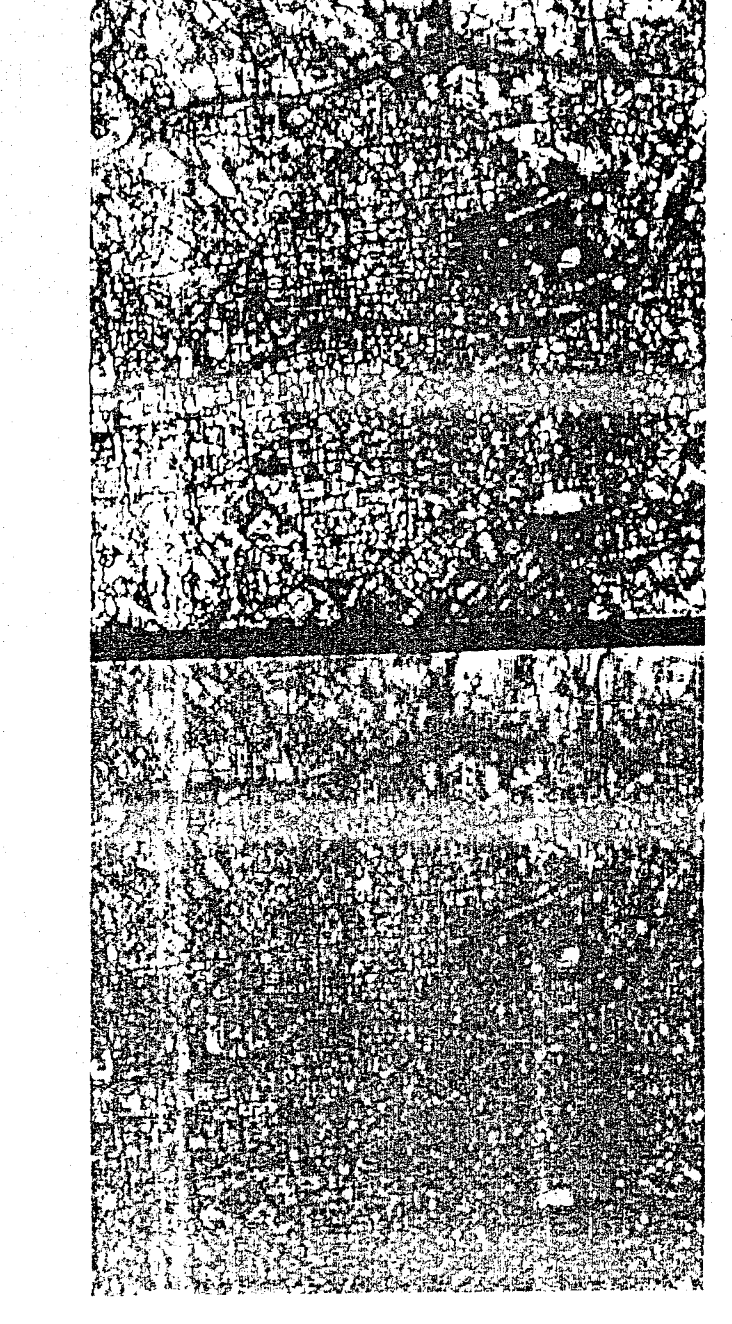


Fig. 6.11* - Efecto de la corrección atmosférica sobre la composición en color [illegible]

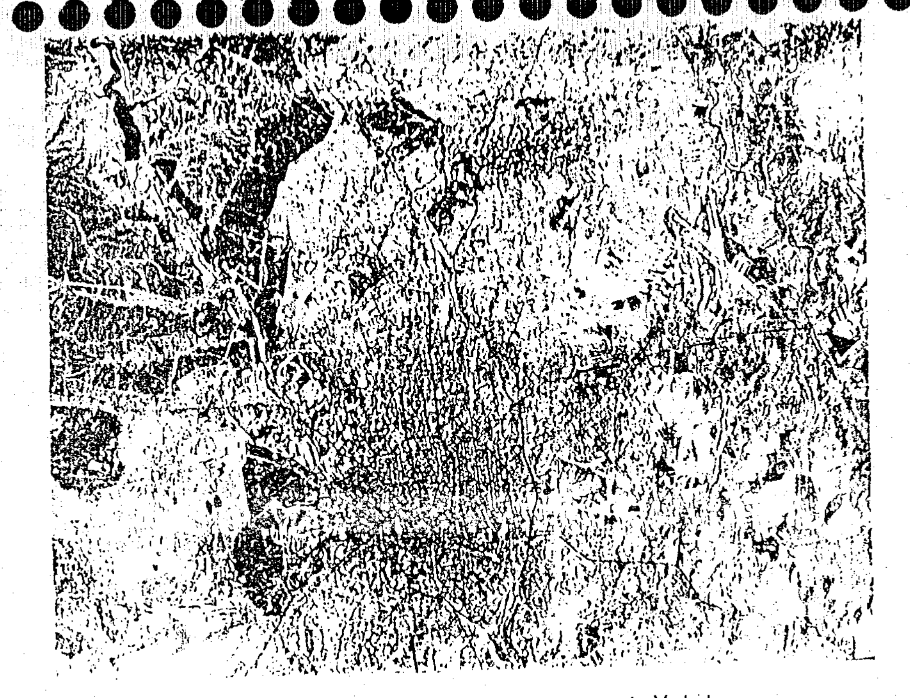


Fig. 6.23* - Composición en falso color de la imagen de Madrid





Fig. 6.34* - Composición a partir de los componentes HSI



Fig. 6.42* - Imagen cociente entre el infrarrojo cercano y el rojo

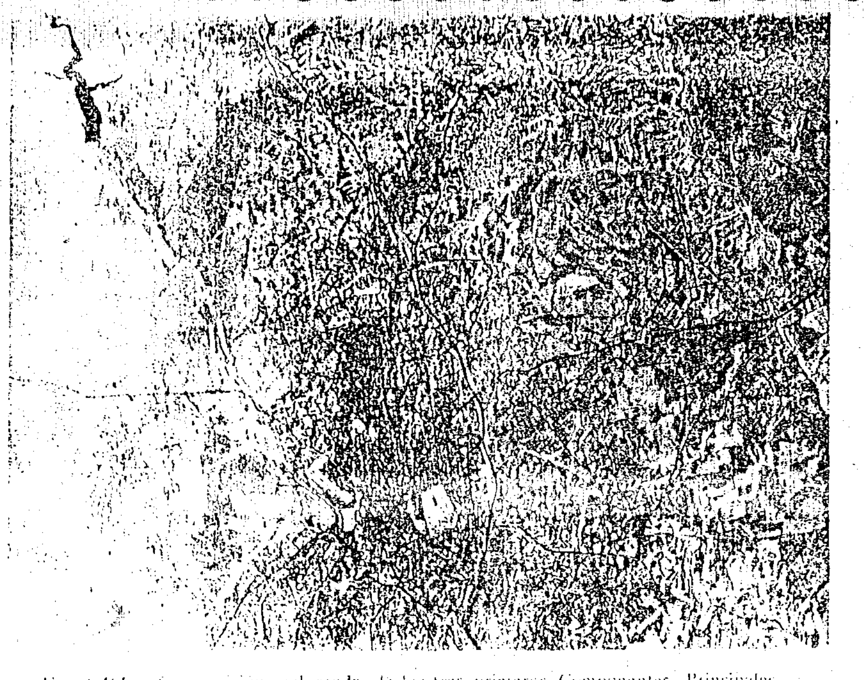


Fig. 6.46* - Composición coloreada de los tres primeros Componentes Principales



Fig. 6.50* - Composición en color a partir de la transformación Tasseled Cap

Caducifolias
Perennifolias
Perennifolios–Matorral
Pastizal
Matorral
Suelos
Urbano Denso
Urbano Exento
Área residencial
Infraestructura
Cultivos regados
Espacios verdes
Agua

0 2 4 6

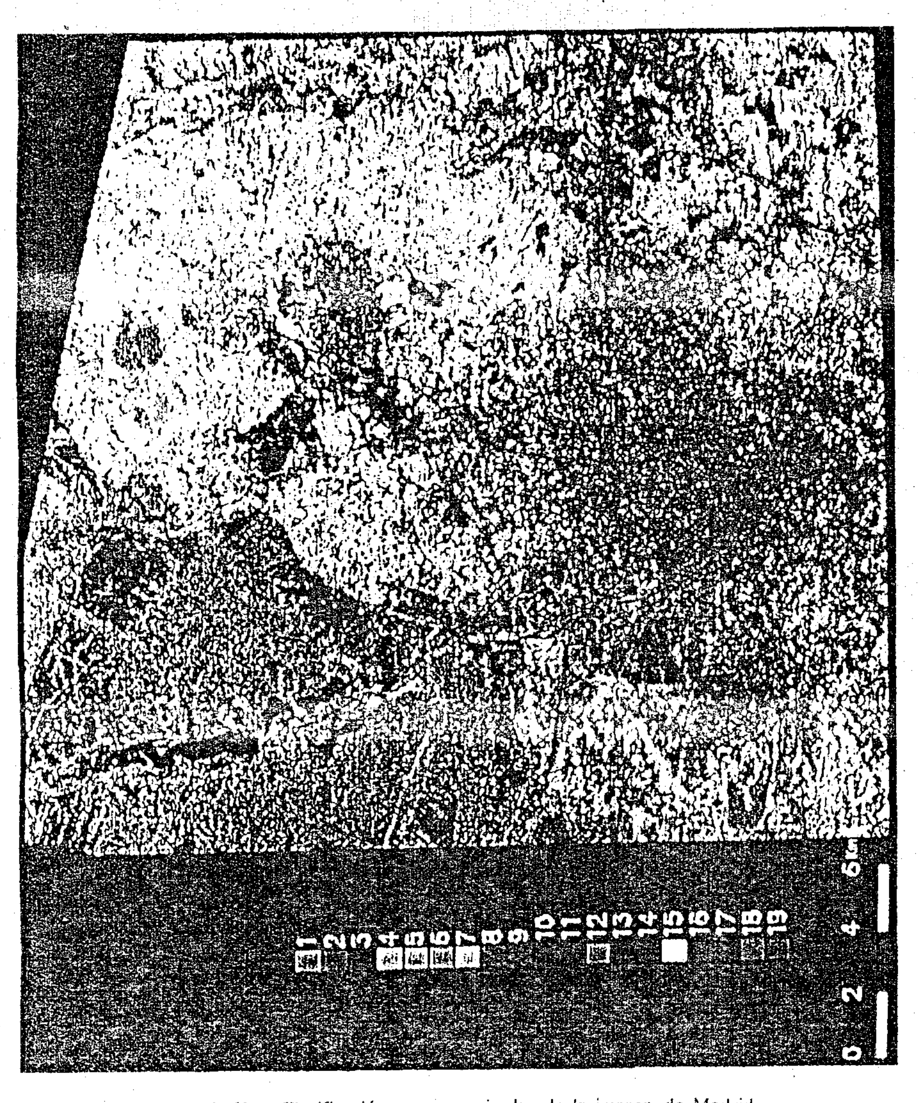
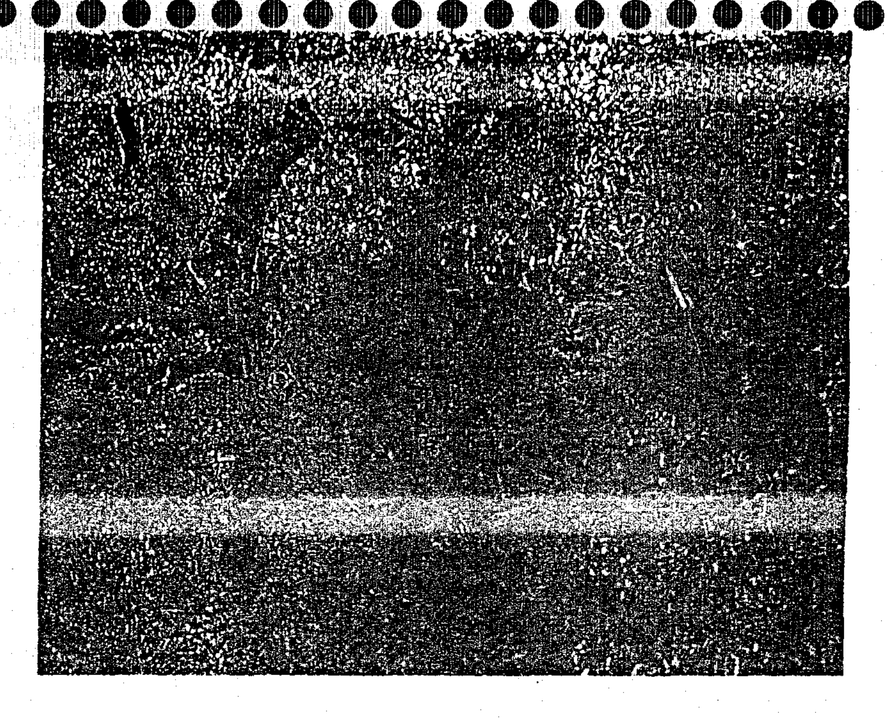


Fig. 6.66* - Clasificación no supervisada de la imagen de Madrid



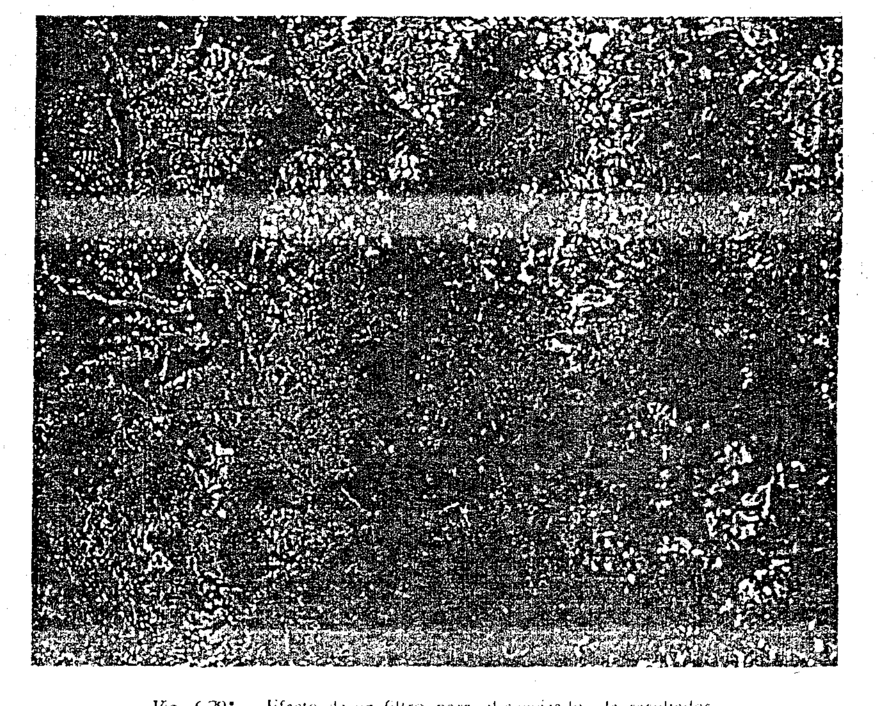


Fig. 6.70* - Efecto de un filtro para el suavizado de resultados

Forestal denso
Forestal poco denso
Matorral denso
Matorral poco denso
Cultivos secano
Cultivos regadío
Urbano
Agua

Fig. 8.10* - Clasificación digital de la imagen de Oropesa

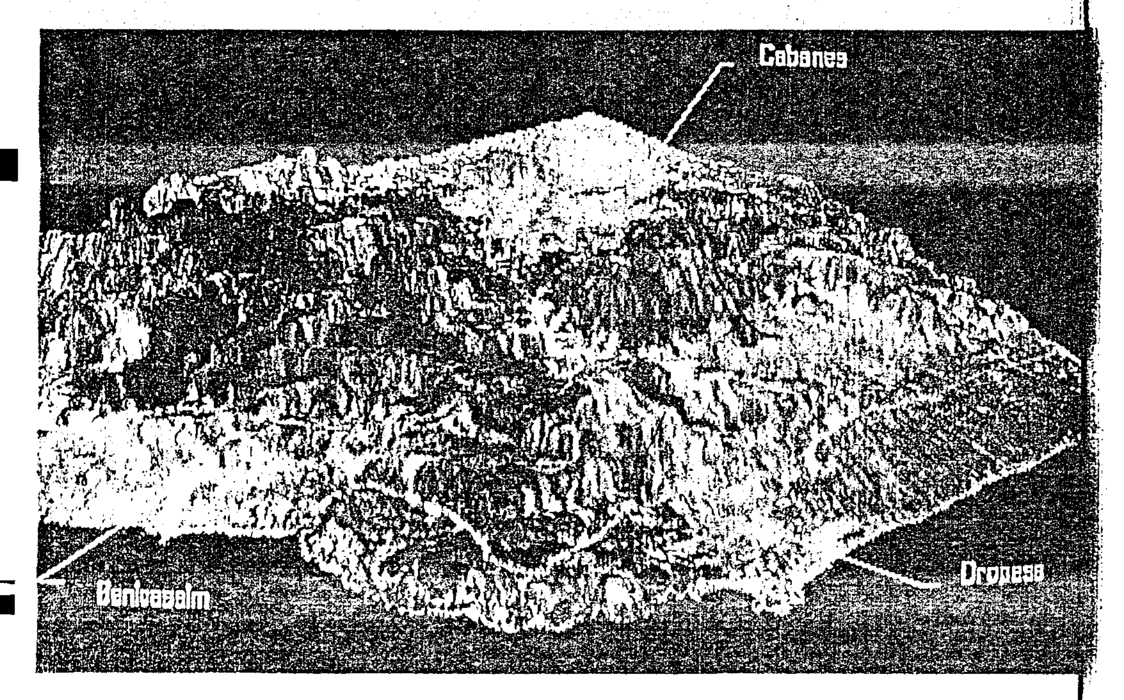


Fig. 8.11* - Perspectiva tridimensional de la superficie afectada por el incendio

6. TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

6.1. LA MATRIZ DE DATOS EN UNA IMAGEN DIGITAL

Como se comentó previamente (3.3.2), el proceso de adquisición d una imagen digital difiere, sustancialmente, del empleado en la fotogra fía aérea. Como es sabido, en cualquier sistema fotográfico, la energí procedente de los objetos se registra sobre una superficie sensible a l luz. Esta puede componerse de una o varias capas, formando, respectiva mente, una película pancromática o en color.

En el caso de los equipos óptico-electrónicos, no existe esta superfici sólida de grabación. El sensor explora secuencialmente la superfici terrestre, adquiriendo -a intervalos regulares- la radiación que provien de los objetos sobre ella situados. La cadencia con la que el sensor realiz ese muestreo de la superficie terrestre define precisamente la resolució espacial del mismo (3.2.1). Dicho en otras palabras, el sensor detecta l radiancia media de una parcela del terreno equivalente al tamaño de pixel, unidad visual más pequeña que aparece en la imagen. Este valo medio se traduce por el sensor a un valor numérico, a partir del cual s realiza el tratamiento digital de imágenes. En consecuencia, cada pixe de la imagen viene definido por un número entero, traducción de l radiancia recibida por el sensor para una determinada parcela de l superficie terrestre y en una determinada banda del espectro. Este valo numérico se denominará, a partir de aquí, Nivel Digital (ND). El nombr se justifica por tratarse de un valor numérico, no visual, pero que pued fácilmente traducirse a una intensidad visual o, si se prefiere, a un nive de gris, mediante cualquier convertidor digital-analógico (un monitor d televisión, por ejemplo). El ND se conoce con distintos nombres en l bibliografía anglosajona: *Digital Number* (Lillesand y Kiefer, 1987) *Pixel Value* (Mather, 1987; Hord, 1986), *Brightness Value* (Jensen, 1986 o *Grey Level* (Schowengerdt, 1983). En nuestro idioma, nos parece má apropiado el término ND para expresar su significado, por cuanto s trata de un valor (digital) con un claro contenido pictórico (nivel de gris)

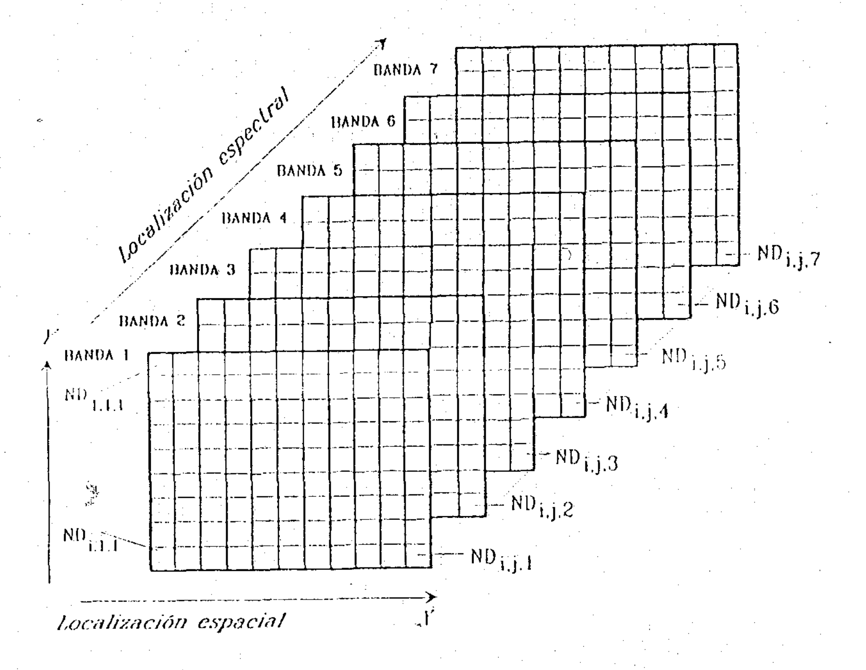


Fig. 6.1 - Organización de una imagen digital

En resumen, la unidad mínima de información en una imagen digital se denomina pixel, definido por un número entero, ND, que puede convertirse en una intensidad luminosa o nivel de gris.

Teniendo presente estas ideas, la organización de los datos en una imagen digital puede esquematizarse en la figura 6.1. Como vemos se trata de una matriz numérica de tres dimensiones. Las dos primeras corresponden a las coordenadas geográficas de la imagen, mientras la tercera indica su dimensión espectral. La orientación aproximada Norte-Sur se expresa a través de las filas de la matriz, que normalmente reciben el nombre de líneas (*line*), mientras las columnas (*column*) indican la disposición Oeste-Este. En esta matriz, el origen de coordenadas se situa en la esquina superior-izquierda (línea 1, columna 1), en lugar del borde inferior-izquierdo, como ocurre en cualquier eje cartesiano. Esto es debido a la secuencia de adquisición de imágenes, de Norte a Sur, de acuerdo a la traza del satélite. La tercera dimensión corresponde a la resolución espectral del sensor. En consecuencia, habrá tantos planos en

la imagen como bandas originalmente detectadas: 7 para el TM, 5 pa el AVHRR, 4 para el MSS ó 3 para el HRV.

Teniendo presente ese carácter matricial de cualquier imag numérica, son más fácilmente comprensibles las posteriores transfo maciones aplicadas sobre ella. Estas son, en muchos casos, operacion estadísticas comunes a otras matrices numéricas. Por ejemplo, en u imagen digital podemos calcular medidas de tendencia central dispersión (media y desviación típica en cada una de las bandas), cambi su orientación geométrica (rotación de la matriz), realizar combinacion aritméticas entre bandas (cocientes), sintetizar varias bandas reducien la información redundante (componentes principales), o discrimin grupos de ND homogéneos dentro de la matriz (clasificación).

Como es lógico, el tratamiento digital de imágenes se apoya equipos informáticos adaptados a esta aplicación. Por ello, se inicia es capítulo con un repaso de las características y componentes de este ti de equipos, que van a marcar el rango de posibilidades que se abra, última instancia, al usuario. Además, se ha introducido un epígra previo, dedicado a la estructura de almacenamiento de datos en est imágenes, con objeto de introducir al lector en el trabajo con este ti de información numérica.

6.2. SOPORTE Y ORGANIZACIÓN DE LA IMAGEN

Cualquier tratamiento digital aplicado a las imágenes, requiere qu éstas sean, previamente, introducidas en un sistema informático: dic de otro modo, que las imágenes sean accesibles al ordenador. Es depende de los soportes y formatos en los que se ofrecen los ND qu definen los pixels de la imagen.

6.2.1. Soporte físico de una imagen

La práctica totalidad de las imágenes obtenidas por satélites d recursos naturales se ofrecen en cintas magnéticas compatibles co ordenador (CCT). Se trata éste de un soporte barato y muy accesibl idóneo para almacenar grandes volúmenes de datos. Las CCT estánda que utiliza la Agencia Espacial Europea o la empresa EOSAT son de pistas (*tracks*), con una longitud de 2.400 a 3.600 pies. El princip problema que plantea una CCT es su acceso secuencial. Para leer un

zona situada en la parte inferior de la imagen, es preciso recorrer los ficheros y/o líneas precedentes, hasta que se acceda al sector de interés. En trabajos de producción, sobre grandes espacios, esta labor de lectura puede resultar muy fatigosa.

El *EROS Data Center*, organismo norteamericano que canalizó -en primera instancia- la difusión de las imágenes Landsat, incorporó, a finales de los años 70, la opción de distribuir imágenes sobre disquetes magnéticos de 8 pulgadas. Esto facilitó la introducción de micro-ordenadores en el tratamiento digital de imágenes, gracias a un proyecto preparado por el *U.S. Geological Survey* (sistema RIPS). El principal inconveniente de este soporte es su limitada capacidad de almacenamiento (hasta varios cientos de veces inferior a una CCT). Pese a ello, EOSAT, la empresa norteamericana actualmente encargada de distribuir productos Landsat, mantiene la posibilidad de pedir imágenes en disquetes de 5,25 pulgadas, en formato compatible con el sistema operativo DOS. Por su parte, la Agencia Espacial Europa no cuenta todavía con esta opción, por lo que en nuestro país todas las imágenes se reciben en cinta magnética. Las principales ventajas del disco flexible son su coste y velocidad de acceso. El precio es significativamente menor que el de una CCT, si bien los costes por unidad de superficie son mucho mayores. En cuanto al acceso, estos discos permiten una lectura directa, por lo que cualquier sector de la imagen puede cargarse en memoria a gran velocidad.

En un inmediato futuro es previsible la distribución de imágenes sobre discos ópticos, ya que mejoran notablemente la capacidad de almacenamiento y la rapidez de acceso de una CCT, a un precio bastante razonable. Sin embargo, todavía no existe ningún organismo distribuidor que haya optado por esta nueva tecnología.

Cuando el usuario pretende comprar una imagen en cinta, debe especificar la densidad y el formato de grabación de los datos. En cuanto a la densidad, las opciones más habituales son 1.600 y 6.250 b.p.i. (*bits per inch*, bits por pulgada). Se denominan, en términos coloquiales, cintas de baja y alta densidad. Si el equipo informático lo permite, resulta más cómodo trabajar con cintas de alta densidad, ya que almacenan un mayor volumen de datos en el mismo espacio físico. Por ejemplo, un cuarto de escena del sensor TM precisa tres cintas de baja densidad para almacenar las 7 bandas, mientras sólo requiere una de alta densidad. Como es lógico, estas últimas precisan un acceso más sofisticado, por lo que las unidades lectoras superan notablemente los costes de las dedicadas a baja densidad.

6.2.2. Formatos de grabación

El formato de grabación indica la organización de los ND que forman la imagen dentro de la cinta magnética. En este sentido, conviene considerar la codificación aplicada y la organización lógica de los datos.

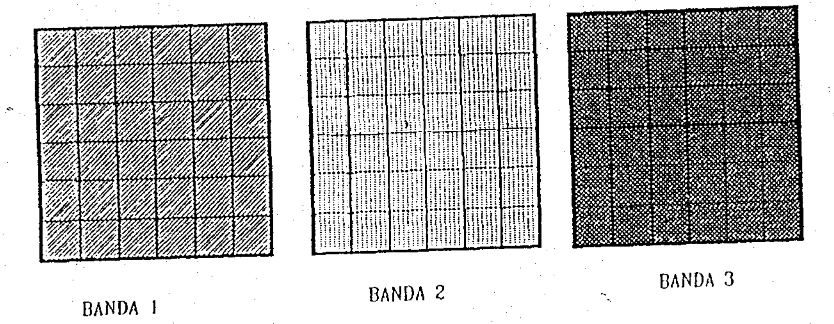
En lo que se refiere al primer punto, los ND de la imagen se graban en código binario (un bit, 0 ó 1). La mayor parte de los sensores emplean grupos de 8 bits para almacenar el ND correspondiente a cada pixel. En definitiva, cada pixel se define por un *byte*, lo que equivale a un rango de 256 niveles (2^8, de 0 a 255). Este es también el rango admitido por la práctica totalidad de los equipos de tratamiento digital, por lo que el acceso a las imágenes se simplifica notablemente. En el caso de algunos sensores, como el NOAA-AVHRR, se codifica la información en 1024 niveles (10 bits), por lo que se requiere una labor previa de compresión de datos para poder visualizar la información en pantalla.

Las imágenes digitales en una CCT se organizan en una serie de ficheros (*files*), cada uno de los cuales se descompone en registros (*records*). Normalmente cada imagen incluye un fichero de cabecera (*header file*), en donde se almacena el formato con el que están grabados los ND que la componen, así como las condiciones en que se adquirió la imagen (tipo de sensor, localización de la escena, día, elevación y azimut solar, etc.), y el tipo de correcciones aplicadas por la estación receptora.

Los registros son de longitud variable, de acuerdo al tipo de fichero y a la organización de la CCT. En el caso de las imágenes Landsat-TM que procesa la ESA, los ficheros de imagen están organizados en registros de 3.600 bytes, mientras los ficheros de cabecera cuentan con 360 y 4.300 bytes.

La distribución de los ficheros en una CCT, está en estrecha relación con el formato en que se graban los ND de la imagen. Los tres formatos más habituales son (fig. 6.2):

(i) Bandas secuenciales (*Band Sequential*, BSQ). Implica que los ND de cada banda se disponen uno a continuación del otro hasta completar todos los pixels de una banda. Tras ellos, se sitúan los ND de la siguiente banda y así sucesivamente hasta completar todas las bandas espectrales de la imagen. Normalmente, entre banda y banda se inserta un fichero de cola y otro de cabecera, con objeto de identificar la región del espectro sobre la que se está recogiendo información. El formato BSQ permite una organización mejor estructurada de los datos, si bien retrasa



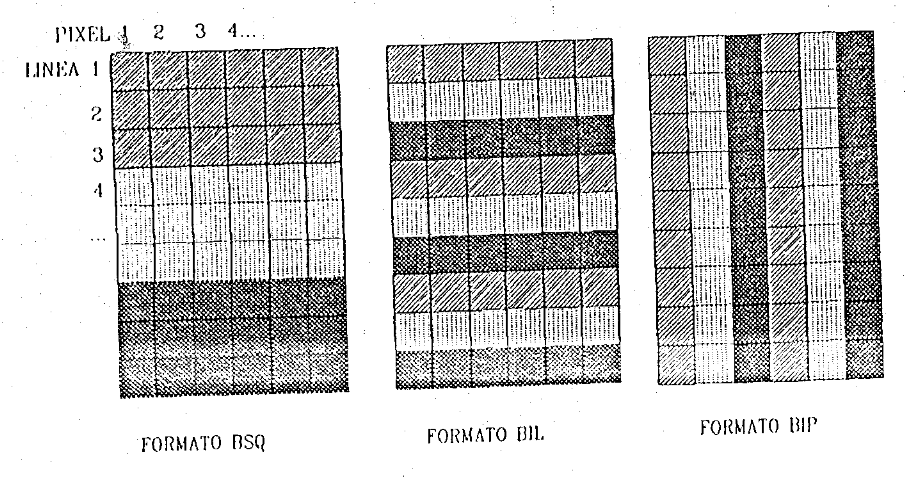


Fig. 6.2 - Formatos de grabación en una imagen digital

la lectura de sub-imágenes, por cuanto es preciso recorrer el conjunto de la cinta para acceder a todas las bandas. No obstante, es bastante habitual en la distribución de imágenes Landsat, al menos en las CCT distribuidas por la red europea EARTHNET.

(ii) Bandas intercaladas por línea (*Band Interleaved by Line*, BIL). En este caso, los ND se organizan por líneas en lugar de por bandas, disponiéndose consecutivamente los correspondientes a todas las bandas, para cada línea, antes de comenzar la línea siguiente. En definitiva, tras los ND de la línea 1, banda 1, se sitúan los correspondientes a la línea

1, banda 2, para luego continuar los de la banda 3, 4, etc., hasta completar el número total de bandas. Tras la primera línea de la última banda se sitúa la segunda línea de la banda 1, de la banda 2, y así sucesivamente. El formato BIL agiliza la lectura de sub-zonas dentro de la imagen. Resulta muy habitual en las imágenes SPOT-HRV, aunque también se utiliza con imágenes Landsat-TM o de otros sensores.

(iii) Pixels intercalados (*Band Interleaved by Pixel*, BIP). En lugar de alternarse los ND en cada línea, se alternan en cada pixel. Así, tras el ND correspondiente al pixel de la línea 1, columna 1, banda 1, aparece el correspondiente a la línea 1, columna 1, banda 2, seguido del adquirido para la línea 1, columna 1, banda 3, etc. Este formato es, hoy por hoy, poco frecuente, ya que fue ideado para agilizar la clasificación de sub-imágenes, cuando se empleaban equipos de escasa memoria. Este formato se aplicó a la distribución de imágenes en disquetes de 8 pulgadas, para alimentar los primeros equipos diseñados sobre micro-ordenadores.

En el caso del formato BSQ, el más habitual en productos de la red europea, la distribución de ficheros en una CCT sería la siguiente (ESA-EARTHNET, 1984):

1. Fichero de cabecera de cinta, que incluye el directorio de la imagen y la organización y formatos de los ficheros subsiguientes.
2. Fichero de cabecera para la banda 1
3. Fichero con los ND correspondientes a la banda 1, ordenados de Norte a Sur y de Oeste a Este, lo que explica que el origen de la matriz se sitúe en el vértice superior-izquierdo.
4. Fichero de cola para la banda 1
5. Fichero de cabecera para la banda 2
6. Fichero de imagen, con los ND de la banda 2,... y así sucesivamente hasta completar el numero total de bandas. Como es obvio, resulta imprescindible conocer la organización de los ficheros en cinta para proceder a la lectura de los ficheros de imagen.

6.3. EQUIPOS DE TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

6.3.1. Componentes físicos

El rango de operaciones que ofrece un sistema de tratamiento digital de imágenes está en estrecha relación con sus componentes físicos (*hardware*). Si bien el usuario no tiene tanta relación con éstos como con los programas de aplicación (*software*), es evidente que cualquier programa se fundamenta en los recursos que le brinda la máquina. Por

ello, conviene conocer los componentes físicos más habituales en un equipo de tratamiento digital, su rango de posibilidades y costes aproximados. Este repaso nos permitirá comprender las posibilidades de los distintos sistemas en el mercado, y planear con mayor acierto su uso o adquisición.

Podemos agrupar el estudio de los componentes físicos en tres apartados, de acuerdo a las tres operaciones básicas en cualquier sistema informático: entrada de datos, proceso-almacenamiento, y salida de resultados (fig. 6.3).

6.3.1.1. Unidades de entrada de información.

Tienen por misión poner en contacto a la máquina con el mundo exterior, encargándose tanto de la adquisición de los datos, como de introducir las instrucciones precisas para el control del proceso. Los primeros ordenadores recibían las instrucciones del usuario a través de unas tarjetas o cintas de papel perforadas. Suponían un medio muy barato, pero extremadamente fatigoso para trabajar sobre grandes volúmenes de datos. Actualmente, el diálogo con la máquina resulta mucho más interactivo, gracias a los teclados y terminales alfanuméricos. Junto al teclado, el tratamiento digital de imágenes incopora otros medios de entrada de información, como son unidades lectoras de cinta, cámaras de vídeo, rastreadores electrónicos, digitizadores o ratones electrónicos.

No obstante, el TECLADO (*keyboard*) sigue siendo imprescindible para orientar el proceso de tratamiento. Aunque presenta una configuración muy similar a las máquinas de escribir, cuenta con algunos elementos originales, como son las teclas de control (ALT, CTRL y teclas

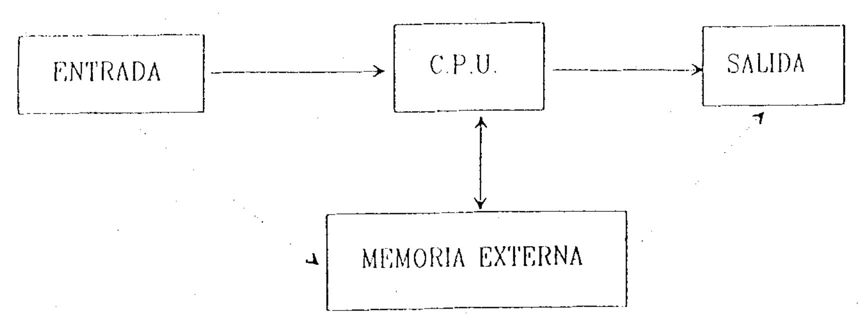


Fig. 6.3 - Flujo de información en un ordenador

de función, F1 a F10), que amplían el rango de posibilidades qu brindan los caracteres alfanuméricos, y las que permiten desplazar cursor una pantalla. El teclado es el medio más habitual para control la ejecución de un programa, puesto que permite introducir instruccion con gran simplicidad.

En lo que se refiere a la introducción de las imágenes al sistema, medio más habitual es la UNIDAD LECTORA DE CINTA (*Tape Drive* Como antes se comentó, la cinta magnética compatible con ordenadc (CCT) es el soporte estándar de las imágenes de satélite, puesto qu resulta económico y permite almacenar una gran cantidad de infor mación. Es similar a las conocidas cintas "cassete", en el sentido de qu pueden grabarse y leerse tantas veces como se considere oportuno. Pc tanto, la unidad lectora de cinta también puede utilizarse como unida de grabación de datos, transfiriendo a una CCT imágenes o datos d interés para su almacenamiento permanente.

Las unidades de cinta son relativamente caras, por lo que algunc equipos de tratamiento digital reciben las imágenes a través de s conexión con un ordenador central, en donde se dispone de esa unidades. Tal conexión puede realizarse en una red local o a través d un MODEM de comunicaciones. El modem permite recibir datos a travé de la línea telefónica convencional, gracias a un programa de comunica ciones apropiado. El acceso puede realizarse en los dos sentidos recibiendo o enviando imágenes, desde o hacia un ordenador distant Esto evita contar con múltiples periféricos de entrada o salida par sistemas de tratamiento digital de bajo coste.

Si bien la cinta magnética resulta el soporte más habitual de la imágenes de satélite, puede ocurrir que éstas se presenten en papel, simplemente que pretendamos introducir en el análisis otros documento convencionales (fotografía aérea, por ejemplo). En estos casos, es precis contar con un instrumento que transforme niveles de gris a valore numéricos (ND), que puedan más tarde ser analizados por el ordenador Los instrumentos más empleados con este fin son la cámara de vide (*video camera*) y el rastreador electrónico (*scanner*).

La CÁMARA DE VIDEO permite digitizar cualquier document analógico, tanto fotografías como mapas, en blanco y negro o color gracias al empleo de filtros. La imagen "capturada" se transmite a ordenador que soporta la cámara, codificándose los tonos de gris e valores numéricos para su posterior análisis. Las cámaras de video ha sido muy utilizadas en el tratamiento digital de imágenes, especialment

para digitizar fotografías áereas. Su principal problema estriba en ser muy dependientes de las condiciones de iluminación, ya que digitizan la imagen a cierta distancia del original. Por ello, es difícil calibrar el resultado, perdiéndose la relación entre los ND y la radiancia originalmente detectada por el sensor.

En los últimos años las cámaras de video se van sustituyendo por otros equipos de digitización de imágenes más precisos, como es el caso del RASTREADOR o lector de barrido (*scanner*). Se trata de un instrumento que permite digitizar automáticamente un texto o imagen a partir de un soporte en papel. El proceso se basa en un dispositivo con puntos de luz dispuestos adecuadamente que rastrea en el papel la densidad de gris impresa. La imagen o texto detectado se transmite al ordenador, convirtiendo dicha densidad de gris en un código numérico a espacios regulares de acuerdo a la resolución del aparato. Al contrario que en la cámara de vídeo, el documento a digitizar está en contacto directo con el instrumento lector, por lo que es menos sensible a las variaciones de luz que aquélla. Muy recientemente han aparecido los rastreadores en color, que permiten digitizar una fotografía aérea o mapa separando los tres componentes lumínicos (azul, verde y rojo).

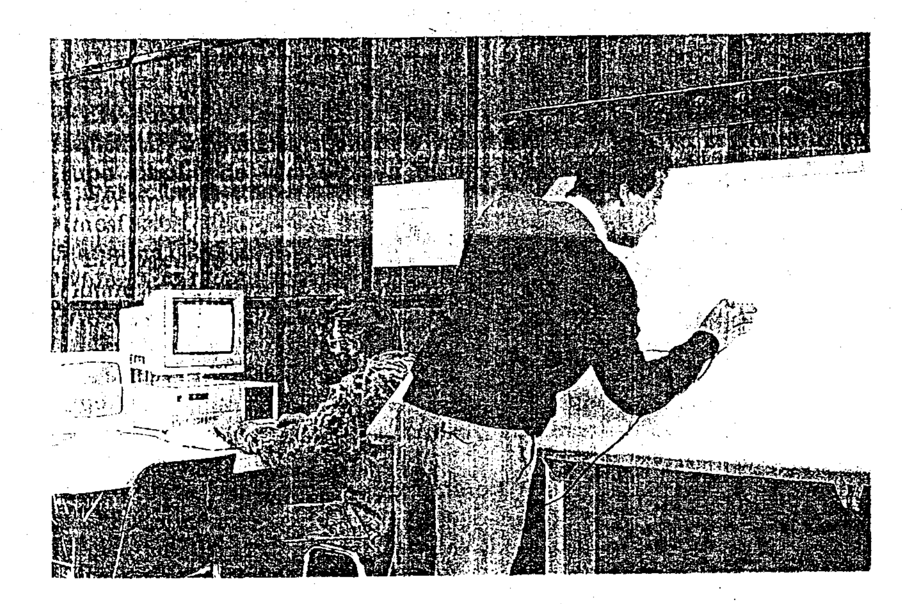


Fig. 6.4 - Equipo de digitización

En muchas ocasiones resultará conveniente introducir al ordenad algún tipo de información vectorial (límites municipales, mapas suelos, carreteras, etc.), para que sea combinada con las imágenes q pretenden analizarse. Para ello se requiere el auxilio de un DIGITIZA DOR (*digitizer*). Se trata de una matriz de circuitos colocados deba de una superficie plana o tableta, que permite detectar el punto exac de la misma en el que se encuentra el cursor (fig. 6.4). Gracias a ell basta recorrer con el cursor la línea o puntos que pretendamos digitiz para que se transmitan al ordenador sus coordenadas sobre la tableta. partir de ahí, pueden convertirse éstas a un sistema de referencia comu para que ambos documentos puedan ponerse en relación. La posición d cursor puede registrarse por dos procedimientos: punto a punto, para que es preciso apretar uno de los botones del cursor; o continuo, en que el ordenador recibe coordenadas mientras el cursor se está movien sobre el papel. La creciente conexión entre la teledetección y los sistem de información geográfica (cap. 8), lleva consigo un papel más destaca para el digitizador, sirviendo ya para la corrección geométrica de l imágenes (6.5.3), ya para la entrada de información auxiliar (6.8.3.4. o la verificación de resultados (cap. 7).

La creciente tendencia hacia un uso cada vez más interactivo d ordenador ha popularizado enórmemente el RATÓN ELECTRÓNIC (*mouse*). Se trata de un instrumento auxiliar para facilitar el movimien del cursor dentro del monitor gráfico. A diferencia del digitizador, ratón sólo registra las coordenadas relativas de su posición en el plano que se mueve. Se emplea para apuntar distintas opciones en un program dibujar sobre la pantalla, o delimitar áreas de interés.

Pese a la reciente pujanza del ratón electrónico, el ADAPTADOR D JUEGOS (*joystick*) aún cuenta con gran tradición en el tratamien digital de imágenes. Se trata de una palanca que gira sobre una rótula cualquier dirección de los 360° del plano, y que lleva una serie interruptores anejos para aceptar distintas opciones de un programa. igual que el ratón, se emplea para mover con facilidad y rapidez cursor sobre la pantalla, aunque el joystick registra coordenadas c mucha mayor precisión que el ratón. Se emplea para delimitar áreas interés sobre la imagen. En algunos equipos más recientes el joystick sustituye por una pequeña tableta de digitización.

6.3.1.2. Unidades de proceso y almacenamiento.

El centro neurálgico del ordenador es la unidad central de proce (*Central Processing Unit*, CPU). Es la base de funcionamiento de

máquina: recibe los datos de las unidades de entrada -normalmente a través de los dispositivos de almacenamiento externos, discos fijos o disquetes-, los almacena provisionalmente en la memoria central, los procesa de acuerdo a las instrucciones que recibe del usuario, a través de un programa, y envía los resultados a una unidad externa. La CPU tiene tres componentes: memoria, unidad de control y unidad aritmético-lógica.

La memoria sirve para almacenar provisionalmente los programas que serán ejecutados por el ordenador, así como los datos de entrada y los resultados. La capacidad de memoria es un dato fundamental a la hora de evaluar la potencia de un ordenador, pues no podrán procesarse programas o datos que excedan la memoria disponible. Como es sabido, suele distinguirse entre memoria de acceso directo (RAM) y memoria permanente (ROM). La mayor parte de los ordenadores personales cuentan con 640 Kb de memoria RAM (1 Kb = 1024 bytes), si bien los más recientes admiten hasta varios Megabytes (1 Mb = 1024 Kb). Los denominados 'ordenadores mini' y estaciones de trabajo, cuentan usualmente con una memoria inicial de 8 Mb, mientras los medios y grandes pueden admitir hasta varios cientos de Mb.

La unidad de control es el dispositivo que dirige las operaciones realizadas en la CPU, coordinando los elementos de entrada, proceso y salida en el ordenador. Para guiar la cadencia de operaciones dispone de un oscilador electrónico de alta frecuencia que, a intervalos regulares, genera los impulsos eléctricos que marcan el ciclo base de la máquina. Esta frecuencia marca, de alguna forma, su velocidad de proceso. Un ordenador IBM-PC o compatible suele trabajar a una velocidad de 6 a 8 MHz, un IBM-AT o compatible a 10 ó 12 MHz., y un ordenador dotado con el nuevo procesador Intel-80386 entre 16 y 33 MHz. Otros elementos a tener en cuenta en la velocidad final de la máquina son: la velocidad de acceso a los periféricos (tipo de bus o canal empleado) y la longitud de datos de proceso simultáneo; esto es, el número de bits que puede procesar simultáneamente. En este sentido, los procesadores más recientes permiten trabajar hasta con 32 bits, mientras los primeros ordenadores personales sólo admitían 8 bits. Para el caso de ordenadores de mayor potencia las longitudes oscilan entre 32 y 128 bits.

La Unidad Aritmética y Lógica es el componente de la CPU que realiza los cálculos y las operaciones con los datos indicados en las instrucciones. Algunos autores le denominan procesador, pues permite tanto operaciones aritméticas (las cuatro elementales), como relaciones lógicas entre datos (=, >, <, ≥, ≤). A partir de combinaciones de ambos

tipos, pueden obtenerse muy variados procesos. Especialmente gracias a las operaciones lógicas puede controlarse la ejecución de un proceso, optando hacia una alternativa u otra en función del resultado de una comparación. Este tipo de operaciones residen en unos circuitos integrados, parte del micro-procesador. Su velocidad de operación es un claro índice de la capacidad del ordenador: normalmente se mide en millones de instrucciones por segundo (M.I.P.S.), o en millones de instrucciones de coma flotante por segundo (M.FL.O.P.S.).

Junto a la memoria central, los ordenadores cuentan también con unidades externas de almacenamiento. Los datos se almacenan provisionalmente en la memoria central del ordenador, pero ésta se destruye una vez que se corta el suministro eléctrico. Para garantizar un almacenamiento más estable de los datos, se envían éstos a una serie de dispositivos externos. Las posibilidades, en este sentido, son muy variadas. En la informática personal los más empleados son los disquetes (*floppies*) y discos fijos (*hard disk*), y, más recientemente, los discos ópticos y cintas de cartucho.

Los disquetes o discos flexibles, están formados por una superficie blanda y flexible de plástico, tipo celuloide, recubierto de óxidos ferrosos por una o ambas caras. Esta superficie está protegida por una funda de plástico, para evitar el contacto con partículas que podrían dañar la información en él grabada. En el centro del disquete, un orificio circular permite acoplar el sistema de lectura o grabación, que se realiza a lo largo de una abertura alargada situada en la parte inferior de la funda protectora. Existen distintos tipos de disquetes, de acuerdo al tamaño y a la cantidad de información que pueden almacenar. Los más habituales son los de 5,25 pulgadas, que almacenan 360 Kb, si son de doble cara y densidad (DS/DD), ó 1,2 Mb. si son de alta densidad (HD). Recientemente se han comercializado los disquetes de 3,5 pulgadas, menos precarios que los anteriores, por estar protegidos por una funda rígida de plástico. Almacenan 720 Kb ó 1,44 Kb, según la densidad de grabación. La principal ventaja de los disquetes es su bajo coste y transportabilidad, pues facilitan el trasvase de información entre ordenadores cuando éstos no están conectados en red (siempre que cuenten con el mismo sistema operativo). Su principal inconveniente radica en su reducida capacidad de almacenamiento, varios cientos de veces inferior a los discos fijos.

Los discos fijos, rígidos o duros, están diseñados a partir de un soporte metálico indeformable, generalmente aluminio, recubierto de una capa magnetizable, que le da al disco larga vida y permite grabar datos con alta densidad. Gracias a ello, almacenan mucha más información que

los disquetes, y el acceso a ella se realiza a mayor velocidad. Son, además, mucho más fiables y resistentes, por lo que constituyen el medio idóneo de almacenamiento, tanto en ordenadores personales como medios y grandes. Al igual que los disquetes, los discos fijos son dispositivos de acceso directo; esto es, puede recuperarse un determinado fichero sin considerar el resto, pues cada sector físico tiene una dirección determinada. En tratamiento digital de imágenes conviene que se cuente con discos de gran capacidad de almacenamiento, puesto que se trata de una aplicación que maneja un enorme volumen de datos. Para un ordenador personal es recomendable contar con un disco duro no inferior a 80 Mb.

Los discos ópticos emplean la tecnología láser para almacenar grandes volúmenes de datos. Un rayo láser de alta potencia altera la superficie del disco de acuerdo a un código binario. Posteriormente, otro rayo de menor potencia, es capaz de registrar esas alteraciones y decodificar la información almacenada en el disco. Por el momento, el problema principal de esta tecnología es que sólo puede alterarse una vez: en otras palabras, no puede modificarse la información sobre él grabada, aunque puede leerse tantas veces como sea preciso (al igual que un compacto musical). Por el momento, sólo son aplicables para retener copias de seguridad de las imágenes originales, en lugar de acceder a ellas a partir de la CCT, que resulta un procedimiento mucho más tedioso. Sus principales ventajas son la gran capacidad de almacenamiento, alta velocidad de acceso y bajo coste.

Como pone en evidencia Mather (1987), el almacenamiento es precisamente uno de los grandes problemas del tratamiento digital de imágenes en teledetección, dado el gran volumen de datos que alberga cada imagen. Por ejemplo, para almacenar una escena completa del sensor Landsat-MSS, se necesitan 32 Mb (4 bandas x 2.286 líneas x 3.600 columnas x 8 bits por pixel), elevándose la cifra a 262 Mb en el caso del sensor Landsat-TM. Parece obvio que no pueden almacenarse muchas imágenes en la memoria externa. Ordinariamente, se trasvasan al disco magnético sólo aquellas imágenes que se requieran en un momento determinado. Si ese proceso debe realizarse con frecuencia, puede resultar conveniente almacenar las imágenes en discos ópticos, lo que facilitará el acceso a sub-imágenes con mucha mayor rapidez y eficacia.

6.3.1.3. Unidades de salida.

Una vez realizado el proceso, el usuario requiere obtener un registro del análisis efectuado, lo que se obtiene a través de una serie de periféricos de salida gráfica.

El MONITOR o consola de visualización resulta una pieza imprescindible en un equipo de tratamiento de imágenes, ya que garantiza un trabajo interactivo con la máquina. Si se emplean ordenadores medios o grandes, este monitor será uno de los terminales conectados a la unidad central. En este caso, el monitor servirá para introducir y obtener instrucciones alfanuméricas. En el caso de los ordenadores personales -y de algunos terminales sofisticados-, puede disponerse de monitores gráficos, que permiten mayores posibilidades para la representación visual de información (mapas, gráficos, imágenes). Lógicamente estos monitores se controlan por una tarjeta gráfica, que define la cantidad de información que puede enviarse a la consola. Entre los sistemas tarjeta-monitor más utilizados en la informática personal cabe citar la Hércules monocromo, resolución de 640 x 400 puntos; CGA, 4 colores, 320 x 200 puntos; EGA, 16 colores, 600 x 350 puntos, y VGA, 64 colores, 640 x 480 puntos.

Estos sistemas estándar no ofrecen aún la calidad suficiente para obtener una buena visualización de la imagen. Por ello, los equipos de tratamiento digital cuentan con procesadores de imagen más potentes, y también mucho más costosos, que las tarjetas convencionales. Actualmente en el mercado existen equipos en un rango de resolución que va desde los 256 x 240 pixels, hasta los 1024 x 1024 pixels. La sensibilidad del equipo de visualización se expresa por el número de bits que puede direccionar cada uno de los tres cañones de color (azul, verde y rojo). Un equipo de 12 bits puede visualizar 16 niveles por color (2^4, 4 bits por color), mientras uno de 32 bits facilita 256 niveles por color (2^8, 8 bits), más otros 256 colores para el plano gráfico, que suele emplearse en información auxiliar. Los sistemas de visualización más habituales son todavía los de 512 x 512 pixels, con una profundidad de 32 bits, aunque las mejoras técnicas en el diseño de tarjetas gráficas de bajo coste explican una creciente demanda para los sistemas de 1024 x 1024 pixels con la misma profundidad.

El principal inconveniente de cualquier monitor radica en su caducidad. En la mayor parte de las ocasiones resulta preciso conservar un registro más permanente del trabajo efectuado, ya sea de las imágenes tratadas, ya de parámetros estadísticos que afecten al tratamiento o a los resultados.

El medio más económico y rápido de obtener esta información en papel es una IMPRESORA. Actualmente existen muy diversos modelos y tecnologías de impresoras. Entre ellas, las más comunes siguen siendo las impresoras matriciales, que construyen los caracteres a partir de una cadena de agujas impactando sobre la cinta. Existen múltiples modelos en el mercado, son baratas y permiten imprimir tanto texto como

gráficos. Se emplean, sobre todo, para los resultados estadísticos del tratamiento digital, si bien pueden asimismo utilizarse para obtener mapas de clasificación de bajo coste y calidad, ya sea por combinación de letras y números, ya empleando la modalidad gráfica de impresión (fig. 6.5a). En el caso de los ordenadores medios y grandes. Las impresoras de línea son más comunes que las matriciales. Su velocidad de escritura es muy superior, puesto que escriben todos los caracteres de una línea simultáneamente. En contrapartida, no permiten impresión gráfica, sólo caracteres alfanuméricos, por lo que sus posibilidades cartográficas se reducen al empleo de caracteres sobre-impresionados.

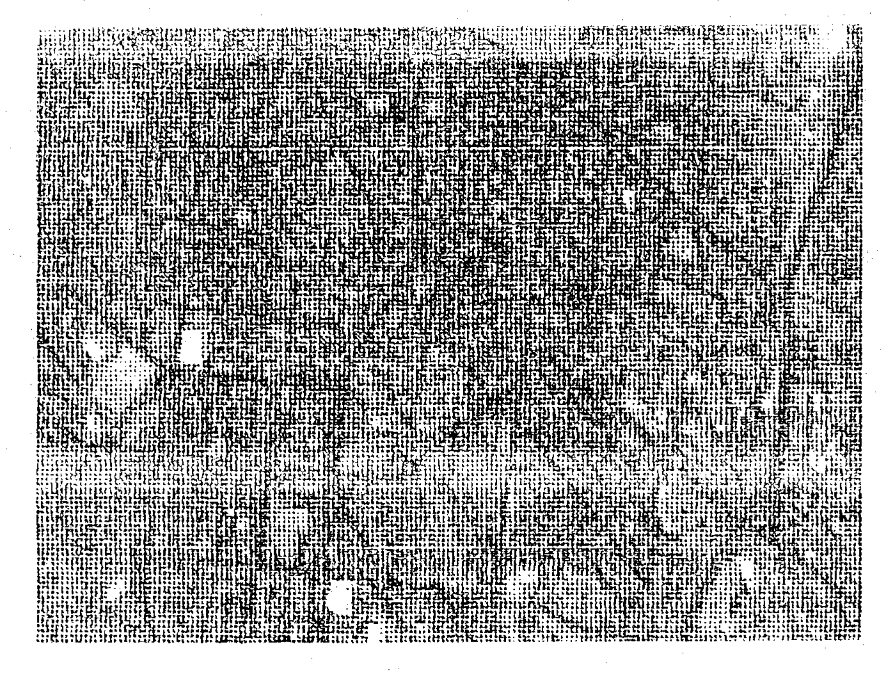


Fig. 6.5 - Ejemplo de salidas gráficas con sistemas de bajo coste: (a) impresora matricial

Si se pretende obtener una copia del mapa o imagen de mayor calidad, habremos de acudir a impresoras que permiten obtener color. Aunque existe una modalidad de impresoras matriciales en color, no resulta ésta una tecnología aceptable para este fin. Mucho más convenientes son las



Fig. 6.5 - (b) impresora de chorro de tinta

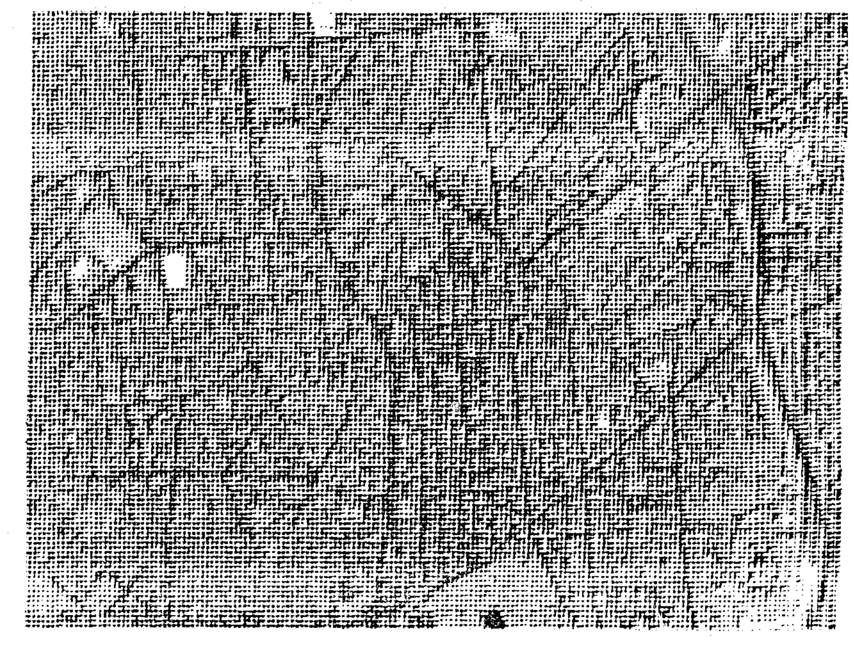


Fig. 6.5 - (c) impresora láser

impresoras de chorro de tinta (*ink-jet printers*). En este caso, las agujas se sustituyen por unos cartuchos con las cuatro tintas elementales (negro, amarillo, magenta y cian), a partir de los cuales puede construirse una amplia paleta de colores. Permiten también obtener texto y gráficos, son relativamente baratas y ofrecen una cálidad intermedia, válida para la realización de trabajos de campo o presentaciones modestas (fig. 6.5b).

Sin duda la tecnología que ha experimentado un mayor desarrollo y aceptación ha sido la impresión electrostática. Las popularmente denominadas impresoras láser se basan en una técnica similar a las fotocopiadoras. Un rayo láser induce una çarga eléctrica sobre las zonas del papel que corresponden a la figura o texto que quiere reproducirse. Posteriormente, estas zonas sensibilizadas atraen un toner químico para formar la imagen original. Estas impresoras proporcionan muy buena calidad de impresión (fig. 6.5c), alta velocidad y bajo nivel de ruido. Su principal problema, desde nuestra óptica, es su carácter monocromático. Si la tecnologia de impresoras láser en color mantiene su actual ritmo de desarrollo, parece previsible su utilización preferente en tratamiento de imágenes, dentro de un inmediato futuro.

También muy reciente es la impresión de imágenes en color por transferencia térmica. Esta tecnología mejora notablemente la resolución y el número de colores obtenidos por las impresoras de inyección de tinta. En su relación calidad-coste, pueden resultar el complemento idóneo para un equipo de tratamiento basado sobre un ordenador personal.

Pese a la mejora de las tecnologías de impresión, todavía resulta muy complejo reproducir la amplísima gama tonal de una imagen. Por ello, estos medios son muy adecuados para mapas de clasificación, donde existen pocos colores a discriminar, pero resultan deficientes para visualizar el rango tonal completo de la imagen. El sistema más sencillo para resolver esta limitación es fotografiar el monitor de visualización. Basta emplear una cámara convencional, preferiblemente con tele-objetivo, para paliar el efecto de curvatura de la pantalla, y con película de alta sensibilidad. Conviene utilizar un trípode para evitar movimientos imprevistos de la cámara, puesto que deberá utilizarse una baja velocidad de exposición.

El problema principal de este método radica en el difícil control de las condiciones de iluminación, la pérdida de resolución frente al monitor, y el efecto de curvatura de la pantalla. Estos problemas pueden solventarse con FILMADORAS ANALÓGICAS O DIGITALES. En el primer caso, se trata de instrumentos que recogen la señal del video a una superficie plana, herméticamente cerrada, sobre la que se aplica una cámara convencional. Este sistema, resuelve los problemas de enfoque y control de la iluminación, aunque resulta complejo de calibrar y mucho más caro que un equipo fotográfico. Las filmadoras digitales, por su parte, convierten directamente los ND a una señal analógica, grabada sobre una película de formato estándar (35 mm).

En el rango más alto de calidad y coste se sitúan los equipos de conversión digital-analógico, sólo viables en grandes centros de investigación o producción. Plotter electrostático en color y plotters de láser son las tecnologías más utilizadas en este momento. Estos periféricos permiten conectar directamente los resultados de nuestro tratamiento con su publicación, sin mediar técnicas fotográficas convencionales.

6.3.2. Componentes lógicos: Software

Obviamente cualquier sistema informático debe conjugar sus componentes físicos con los programas de aplicación, que controlan el funcionamiento del *hardware* hacia un determinado objetivo. Ambos componentes están íntimamente unidos en un equipo de tratamiento digital de imágenes, puesto que se trata de sistemas orientados hacia una

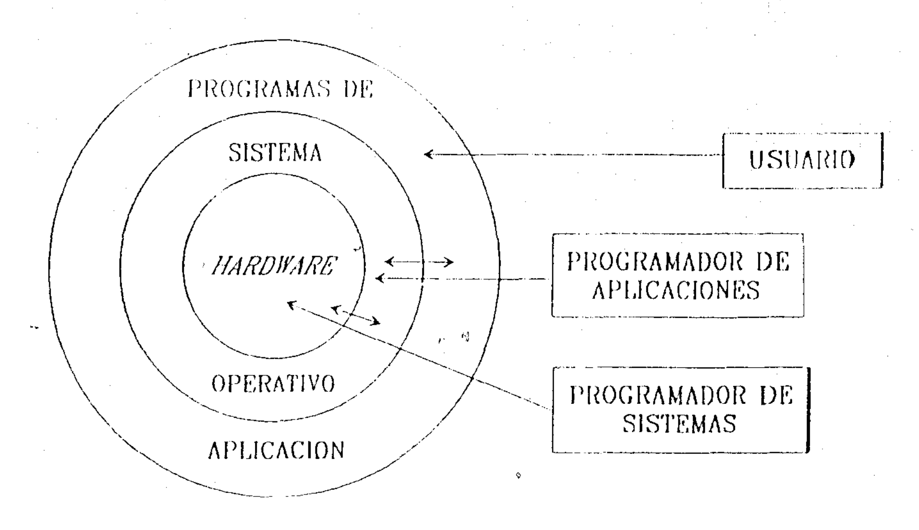


Fig. 6.6 - Relaciones entre hardware, sistema operativo y programas de usuario

aplicación particular. En otras palabras, el tipo de componentes físicos del equipo condiciona el rango de operaciones que le permite realizar al usuario.

Dentro de los componentes lógicos de un ordenador, suelen distinguirse dos categorías básicas: sistema operativo y programas de aplicación. El sistema operativo es un conjunto de programas y comandos que organizan el flujo de información y el control de los periféricos que posee el ordenador (fig. 6.6). Juega el papel del director de orquesta, que integra todos los elementos para asegurar un funcionamiento armónico. Será conveniente que el usuario conozca los comandos del sistema operativo para asegurar un diálogo inteligente con la máquina. Hay que tener en cuenta que, en los ordenadores más recientes, el sistema operativo no está ligado exclusivamente a una máquina, por lo que los programas de aplicación pueden transportarse de un ordenador a otro, siempre que, lógicamente, posean el mismo sistema operativo (con los periféricos pertinentes). Los sistemas operativos más utilizados son el MS-DOS, para ordenadores personales, y el UNIX y VMS para los ordenadores medios y grandes.

Los programas de aplicación utilizan los recursos del sistema operativo para comunicarse con el ordenador. Como es bien sabido, el ordenador sólo es capaz de procesar caracteres binarios, por lo que toda instrucción que el usuario pretenda ejecutar ha de ser convertida a este código. Esta tediosa labor la ejecutan los compiladores, programas que convierten una serie de instrucciones más o menos cercanas al lenguaje humano en un código que entienda la máquina. Existen distintos compiladores para cada uno de los lenguajes de programación, y para los sistemas operativos más comunes. Entre los lenguajes más empleados en tratamiento digital de imágenes están el FORTRAN, C, APL y Pascal, con un dominio claro de los dos primeros.

Una vez escritos y compilados, los programas de aplicación están listos para ser ejecutados. Lo habitual será que el usuario disponga de un conjunto de programas de aplicación, que abarquen las operaciones más destacadas en tratamiento digital de imágenes, y sólo tenga que diseñar sus propios programas para satisfacer necesidades muy particulares de la investigación. Estos nuevos desarrollos se facilitan gracias a disponer de librerias de programas, formadas por utilidades de uso común (lectura de una imagen, convolución, obtención de coordenadas, etc.). En los sistemas más recientes, los programas de tratamiento se ejecutan mediante un sistema de menús. Esto quiere decir, que las distintas opciones que ofrece se acoplan a un programa director, desde el que se

seleccionan, lo cual permite un diálogo más interactivo con el usuario del equipo.

6.3.3. Equipos de tratamiento digital

En la mayor parte de los casos, un equipo de tratamiento digital de imágenes es un sistema cerrado. Quiere esto decir que hardware y software se integran en una serie de componentes bien estructurados, hacia la resolución de una serie de aplicaciones. Se denominan, en tono informal, sistemas llave en mano, puesto que no requieren un conocimiento informático muy extenso para poder abordar las principales aplicaciones. Estos sistemas ofrecen normalmente una estructura modular, de tal forma que el usuario puede adquirir una configuración básica y añadir en el futuro distintas opciones, tanto de programas como de periféricos.

Simplificando mucho las cosas, podemos dividir los equipos de tratamiento digital de imágenes en el mercado en tres categorías: (i) aquellos basados en un ordenador personal, (ii) aquellos soportados por un ordenador personal, y (iii) aquellos soportados por un ordenador medio o grande. Las posibilidades de estos tres grupos están en razón directa a su coste, por lo que, en función de las necesidades y del presupuesto disponible, será el usuario final el que juzgue la conveniencia de una u otra opción.

Conviene introducir, previo al estudio de los sistemas más representativos, que no existe un criterio absoluto para abordar la elección. En otras palabras, para evaluar un equipo de tratamiento digital de imágenes habrá que pensar en todo momento en la aplicación a la que se destina. Un usuario con interés en aplicaciones geológicas valorará la capacidad de visualización del equipo, así como las transformaciones y realces que ofrezca. Por el contrario, un interesado en cartografía de la vegetación o de la cubierta del suelo, estará más atento a los algoritmos de clasificación que incorpora. Para uno y otro usuario, sin embargo, convendrá tener en cuenta algunas características generales:

- Calidad del *hardware* en relación con el coste. Potencia del ordenador central, capacidad de almacenamiento, resolución del sistema de visualización, periféricos disponibles para futuras expansiones.
- Rapidez de proceso, en función de los componentes físicos, pero también del lenguaje de programación y de la estructura de los algoritmos empleados. Convendrá anotar los tiempos empleados en realizar operaciones comunes, como seria filtrar o clasificar una ventana de la imagen.

- Diálogo con el usuario. La mayor parte de los equipos más recientes mejoran notablemente la facilidad de manejo, incorporando un sistema de menús y una serie de instrucciones de ayuda al usuario. Convendrá tener en cuenta este aspecto de cara a obtener resultados en el menor tiempo posible.
- Ampliación del software. Un usuario novicio normalmente no necesitará ampliar las posibilidades del sistema. Sin embargo, cuando se pretende abordar un proyecto más específico o una tarea de investigación será habitual redactar programas propios para obtener la finalidad pretendida. La comunicación hacia el exterior del software surge aquí como una opción clave. Las firmas comerciales no facilitan el código fuente de sus programas, pero sí ofrecen una relación de subrutinas que pueden emplearse en programas escritos por el usuario. Lógicamente éstas se relacionan con el lenguaje en el que se diseñó el sistema: FORTRAN, C, APL, BASIC, etc. En cualquier caso, nos parece especialmente importante asegurar el diálogo del sistema con el exterior, puesto que aun con paquetes de programas muy sofisticados siempre pueden surgir ocasiones para el desarrollo de nuevas aplicaciones.

De acuerdo a la tipología antes establecida, comentaremos las características más destacadas de los equipos de tratamiento digital de imágenes actualmente en el mercado.

6.3.3.1. Equipos basados en un ordenador personal

En el rango inferior de la escala estarían los equipos basados exclusivamente en un ordenador personal. Al *hardware* habitual en estos micro-ordenadores, se incorpora una tarjeta gráfica estándar y un monitor de color de media o alta resolución. Esto permite visualizar zonas pequeñas, con una reducida paleta de colores (entre 4 y 256). Son sistemas idóneos para la enseñanza introductoria, pues, además de su bajo coste, proporcionan la mayor parte de las operaciones elementales: visualización, realce y clasificación de la imagen. Asimismo, ofrecen copias en papel de las imágenes tratadas, gracias a aprovechar las posibilidades gráficas de una impresora de matriz convencional.

Un ejemplo de este tipo de programas es el denominado LANDSAT (Loomer, 1987). Requiere únicamente un ordenador IBM-PC o compatible con un mínimo de 640 Kb de memoria RAM, y una tarjeta y monitor EGA. Pese a estos modestos requisitos, el programa ofrece interesantes posibilidades. Permite visualizar las imágenes en blanco y negro (máximo de 13 niveles de gris) o en color (5 niveles por color, 125

tonalidades). Con objeto de aumentar las posibilidades gráficas de l tarjeta EGA, se utiliza una técnica denominada *dithering*, que simul hasta 132 colores en pantalla, con una resolución máxima de 320 x 16 pixels. Para ajustar los ND originales de la imagen a este rango s permiten distintas opciones, tras visualizar el histograma de la imagen e memoria. El programa también ofrece una clasificación de máxim verosimilitud modificada, muy versátil y fácil de utilizar. Se admiten u máximo de quince categorías, y pueden seleccionarse varios campos d entrenamiento por categoría. Por último, el programa LANDSAT ofrec opciones para salvar en disco una composición coloreada o un mapa d clasificación, seleccionar distintas ventanas dentro del fichero de l imagen, y obtener copias en papel de una banda o del mapa de clasifica ción. Para ello, se emplea una impresora matricial de bajo coste.

Si se dispone de un presupuesto más amplio, una opción de gra interés la constituye el programa DRAGON™ (Goldin y Rudahl, 1989 Al igual que el LANDSAT, se trata de un sistema de tratamiento digit de imágenes basado sobre un ordenador personal. Puede utilizarse en un amplia variedad de configuraciones, si bien se recomienda contar co una tarjeta gráfica VGA y monitor compatible. Esto le permite visualiza 256 colores en pantalla, sobre una zona de 320 x 200 pixels. El program se organiza en un sistema jerárquico de Menús, que acceden a todas la funciones diseñadas para el sistema. Esto facilita notablemente s manejo, lo cual le hace idóneo para labores de enseñanza. El rango d operaciones que incluye el programa abarca las más habituales e tratamiento digital: visualización de imágenes, filtrajes, combinacione lineales entre bandas, y clasificación, supervisada y no supervisada. L salida gráfica puede realizarse con impresoras matriciales, láser y d inyección de tinta. Debido a las limitaciones de la memoria gráfica, sól permite clasificar con un máximo de 7 categorías y 4 bandas. E programa se completa con una serie de utilidades para acceder imágenes adquiridas en otros formatos, así como exportar los resultado de la clasificación a programas de cartografía digital de bajo coste. E consecuencia, resulta idóneo para un ámbito docente.

6.3.3.2. Equipos soportados por un ordenador personal

El escalón siguiente está ocupado por aquellos equipos que se apoya en un ordenador personal, pero que incorporan tarjetas gráfica especiales o procesadores de imagen que amplían notablemente la posibilidades de visualización. Gracias a ello, pueden conectarse co monitores que facilitan media y alta resolución: desde 256 x 240, hast

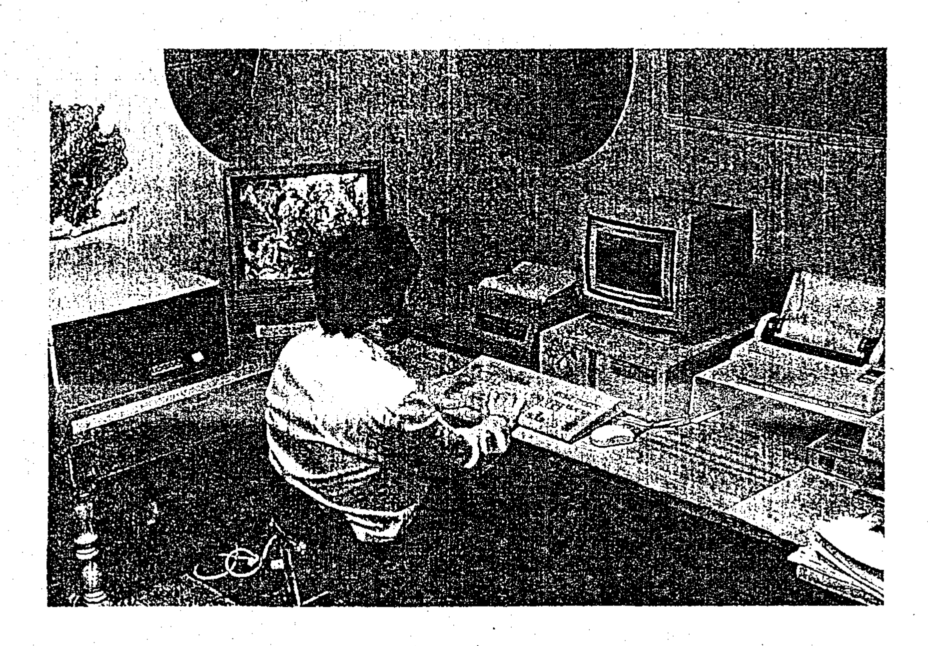


Fig. 6.7 - Componentes de un equipo de tratamiento digital de imágenes

1024 x 1024 pixels. En cuanto a las opciones de análisis, estos sistemas ofrecen las operaciones de realce y corrección más habituales, distintas estrategias de clasificación y soportan una buena gama de periféricos gráficos (fig. 6.7).

Las principales limitaciones de estos sistemas son su lentitud y escasa capacidad de almacenamiento, lo que restringe su empleo en trabajos de producción. Son, sin embargo, idóneos para la enseñanza superior y para múltiples actividades de investigación, por lo que resultan idóneos para un pequeño departamento universitario.

Los rápidos avances en la micro-informática tienden a corregir las limitaciones antes enunciadas, con la introducción de procesadores de 32 bits, discos ópticos y nuevos sistemas operativos. Parece que, actualmente, el principal problema viene dado por las características del MS-DOS, el sistema operativo estándar en el mundo de los ordenadores personales. Su principal problema atañe a las limitaciones que ofrece para manejar simultáneamente una memoria RAM superior a 640 Kb. Esto retrasa notablemente diversas operaciones digitales, que podríamos denominar de "cálculo pesado": correcciones geométricas precisas, análisis

de componentes principales o clasificadores de máxima verosimilitud por ejemplo.

Entre los equipos de estas características, el que cuenta con una mayor difusión internacional es el sistema ERDAS (ERDAS, 1988). Cuenta con versiones para ordenadores mini (Sun, Prime, Micro-Vax, etc.) empleando VMS o UNIX como sistemas operativos. En lo que se refiere a la versión para el DOS, ERDAS ofrece múltiples operaciones de análisis, desde lectura, visualización, correcciones y transformaciones de la imagen, hasta diversos algoritmos de clasificación y salida gráfica. Incorpora asimismo un módulo para la creación de modelos digitales del terreno, perpectivas tri-dimensionales, y Sistemas de Información Geográfica. Estas capacidades de cartografía integrada se amplían gracias a la conexión del sistema con otros programas que manejan información vectorial (ARC/INFO, por ejemplo). En cuanto a salidas gráficas, facilita tres opciones principales: impresoras de inyección de tinta, para una calidad/coste medio, impresoras de transferencia térmica, que consiguen una calidad mucho mayor, y filmadoras digitales, de considerable calidad, que proporcionan reproducciones en formato estándar de 35 mm.

Junto a este sistema, existe una amplia gama de equipos en el mercado con éstas o similares características. Sus costes y prestaciones son muy variados, en función, principalmente, de la calidad del *hardware*. Los más interesantes son los manufacturados por *Decision Images*, *Terramar Gems*, e *Imavision*. En nuestro país, existe una firma comercial (Micron España), que ofrece un equipo similar con software de diseño propio.

6.3.3.3. Equipos soportados por un mini-ordenador

El escalón superior en los equipos de tratamiento está constituido por aquellos sistemas conectados a un mini-ordenador, tipo Sun, Masscomp, Prime, DEC-Vax, etc. Estos equipos ofrecen mayor rapidez y capacidad de almacenamiento que los ordenadores personales. Sus sistemas operativos, principalmente UNIX y VMS, les permiten realizar a la vez diversas tareas, y ser accedidos por varios usuarios simultáneamente. Los algoritmos que incorporan son también más sofisticados, facilitando toda la gama de corrección, realce y clasificación de imágenes. Permiten trabajar sobre extensas superficies, con un rango de visualización entre 512 x 512 pixels y 2048 x 2048 pixels. Los costes de estos equipos son muy superiores a los incluidos en el epígrafe anterior, especialmente en lo que se refiere al *hardware*. Todavía existe un notable contraste entre el coste de los ordenadores personales y minis, aunque se tienden a

reducir con las mejoras en las prestaciones de los primeros, y la disminución del coste en las llamadas "estaciones de trabajo" (*workstations*).

En cuanto al *software*, algunas firmas comerciales que trabajan en el mundo de los PC ofrecen también versiones para mini-ordenadores, lo que permite transferir información con gran facilidad entre ordenadores pequeños y medios. Junto a estos sistemas, otras firmas trabajan exclusivamente en este dominio, facilitando un rango de operaciones muy amplio. Una de las empresas líder en proceso de imagen es *International Imaging Systems* (I2S), que ofrece diversos sistemas de tratamiento sobre VMS y UNIX. Se trata de sistemas "llave en mano", con una gran capacidad de almacenamiento y rapidez, lo que les hace idóneos para un centro de producción cartográfica.

Otros equipos comerciales de similares características son los manufacturados por Dipix, ERDAS, GEMS y Microm. Junto a estos sistemas, existen también varios paquetes de programas diseñados en distintos organimos oficiales de Estados Unidos, lo que permite adquirirlos por cantidades simbólicas. Entre ellos, destacan por su calidad técnica y amplia extensión, los programas VICAR y ELAS, ambos realizados en distintos centros de NASA.

6.4. OPERACIONES DE UTILIDAD GENERAL

Una vez repasados algunos conceptos introductorios, se inicia ahora el estudio de las operaciones más comunes en tratamiento digital de imágenes, siempre en el contexto de las aplicaciones de la teledeteción espacial.

Con fines didácticos, se ha optado por aplicar el rango de operaciones incluido en este capítulo a un mismo territorio. Para ello, se seleccionó una imagen de 900 x 1000 pixels, adquirida por el sensor Landsat-TM el 2 de agosto de 1984. Corresponde a la ciudad de Madrid y a sus alrededores: Monte del Pardo, núcleos urbanos del área metropolitana, campos de cultivo anejos y vega del Jarama (fig. 6.8). Nos ha parecido una zona suficientemente variada como para servir de ilustración a la mayor parte de los tratamientos que siguen, de tal forma que pueda contrastarse su validez con otras técnicas anejas.

Los procesos aplicados sobre esta imagen se basan en un equipo de tratamiento digital ERDAS, disponible en el Departamento de Geografía

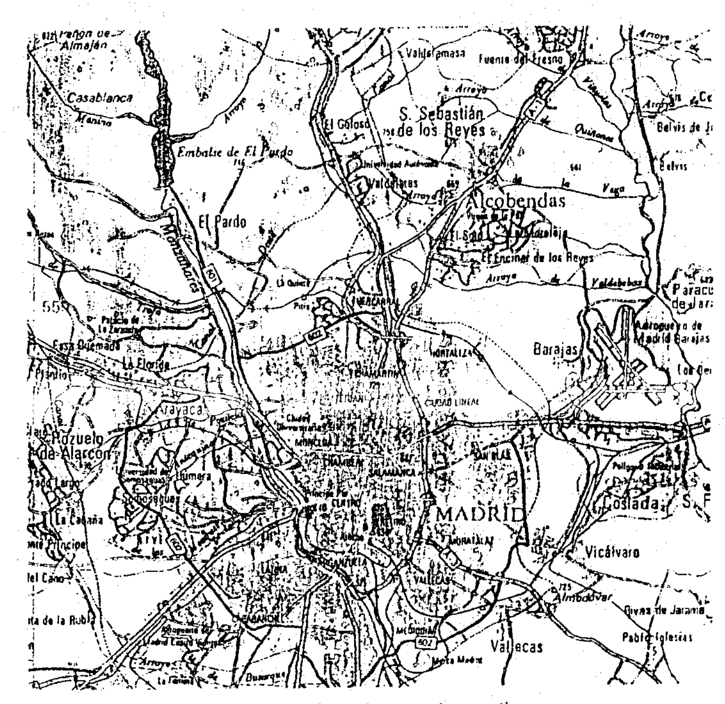


Fig. 6.8 - Mapa de zona de estudio

de la Universidad de Alcalá (fig. 6.7). Se trata de un sistema basado en un ordenador personal (IPC 80386), con procesador matemático, tarjeta gráfica VISTA y monitor Microvitec (resolución de 1.024 x 1.010 pixels, 32 bits). Como terminales gráficos se ha empleado una impresora de inyección de tinta (Tektronics 4696) y fotografías directas del monitor, fuente de la mayor parte de las figuras de este capítulo. Esta descripción puede resultar conveniente para que el lector estime los recursos utilizados, si bien -como es lógico- las operaciones incluídas en el texto no son exclusivas del equipo de tratamiento utilizado. Obvia decir que el empleo de este equipo no implica un menosprecio hacia otros, sino sólo un aprovechamiento de los recursos de que disponíamos.

Se inicia el examen de las técnicas de tratamiento digital con aquellos procesos que hemos calificado de utilidad general, por cuanto pueden aplicarse a diversas finalidades y sirven de escalón intermedio para otras operaciones más específicas. Se incluyen en este apartado aquellos procesos que se relacionan con el manejo de ficheros, cálculo de estadísticas sobre la imagen, y visualización.

6.4.1. Manipulación de ficheros

Cualquier sistema de tratamiento de imágenes incluye una serie de utilidades generales, que le permiten manipular apropiadamente los ficheros donde se alojan las imágenes, así como las distintas transformaciones que sobre ellas se apliquen.

Por ejemplo, el primer paso para trabajar con una imagen digital es seleccionar de la original una ventana que coincida con el área de estudio. Esto supone aislar una parte del fichero que alberga el conjunto de la imagen, por lo que se requiere un programa que extraiga de ese fichero un número de líneas y columnas determinado. En nuestro caso, se aisló una ventana correspondiente a las líneas 1.900 a 2.799, y columnas 200 a 1.199 del conjunto de la escena. Conviene que estos programas de lectura de imagen incorporen alguna rutina para la visualización del área designada, lo que facilitará una localización interactiva de las coordenadas inicial y final de esa ventana, agilizando bastante el proceso de búsqueda. Del mismo modo, resulta muy adecuado incorporar una rutina para leer la imagen con un factor de reducción (6.6.5), lo que permite visualizar una superficie mayor a la que admitiría la resolución de la pantalla. Esto implica, en definitiva, un muestreo sistemático de la imagen, eligiendo una columna y línea de cada **n**, siendo n el factor de reducción. Una vez localizada el área de interés sobre esa zona más amplia, puede accederse a aquella con la plena resolución de la imagen (pixel a pixel).

También dentro de estas utilidades se sitúa la posibilidad de componer una imagen a partir de dos, o sobre dos bandas distintas, obteniendo una mezcla de información interesante para la representación visual. Este fue el proceso seguido para componer la portada de esta obra. La parte izquierda de la ilustración corresponde a una clasificación no supervisada de la imagen de Madrid, con su leyenda incorporada, mientras la derecha representa una visualización en falso color (bandas 4,3,2), que recoge la continuación hacia el Este del área clasificada. Más adelante se comentará el proceso de adquisición de cada una de estas porciones. Basta aquí indicar que se trata de un mosaico de dos imágenes, que pretende expresar las dos formas de interpretación -visual y digital- disponibles a partir de los sistemas de teledetección espacial.

Esta composición puede realizarse partiendo de un polígono irregular, que sirva para aislar determinadas zonas de la imagen de cara a un tratamiento específico. Por ejemplo, pueden introducirse límites admi-

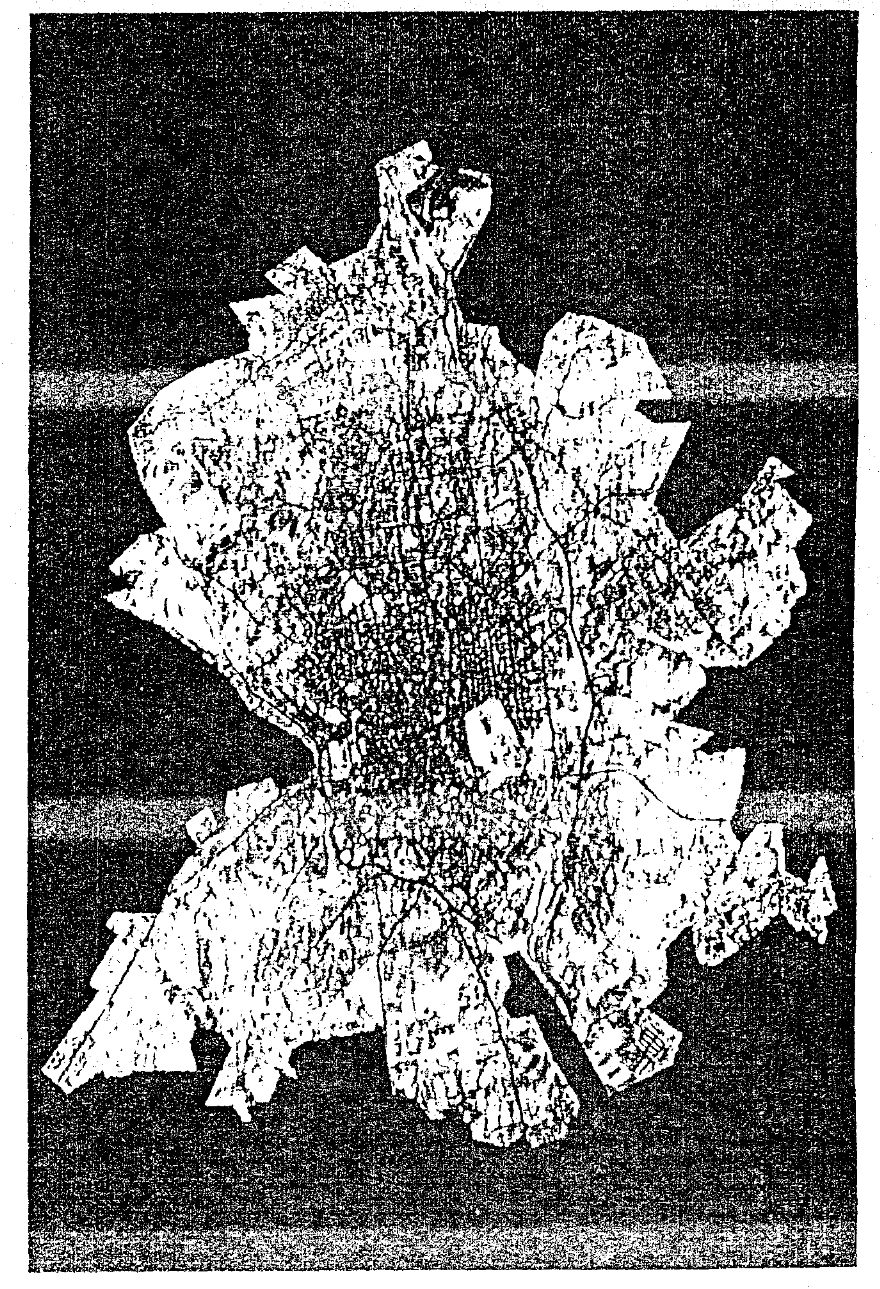


Fig. 6.9 - Aislamiento de la zona urbana mediante máscaras

nistrativos o lindes de cuencas hidrográficas para restringir la clasificación sólo a esos sectores de la imagen, prescindiendo del resto. El trabajo con sectores irregulares de la imagen implica los siguientes procesos:

(i) Delimitar los límites de ese polígono, con ayuda de un digitizador, *joystick*, o ratón electrónico.

(ii) Aplicar ese polígono a la imagen original, aislando todos aquellos pixels que se sitúen en el interior de dicho polígono de los que se encuentren fuera. Estos últimos pasaran a tener un ND de 0, por lo que son eliminados de posteriores tratamientos.

La figura 6.9 ilustra la realización de este proceso para la imagen de Madrid. Sobre la composición en falso color, se delimitó el área urbana, con la ayuda del ratón electrónico. Posteriormente se aplicó ese polígono a la banda 4 de la misma imagen, aislándose el componente urbano, tal y como se interpretó visualmente, del resto de la escena.

Estas operaciones no serian posibles si el programa no conociera previamente la estructura de la imagen: su nombre, número de líneas y columnas, coordenadas de referencia, número de bandas, formato de grabación, etc. En el sistema ERDAS, esa información se asocia permanentemente a la imagen gracias a un programa de utilidad, denominado *Fixhed*. Una vez que cuenta con esos datos, el programa puede conocer las dimensiones y formato de la imagen, facilitando la labor de visualización, búsqueda de coordenadas o las transformaciones lineales entre bandas.

6.4.2. Cálculo de estadísticas e histograma de la imagen

Ya hemos indicado que cualquier operación aplicada sobre la imagen parte de su carácter digital. Por tanto, conviene conocer las estadísticas elementales que la definen, cara a su mejor interpretación y a orientar los posteriores procesos de realce visual (6.6) o transformación (6.7).

Por estas razones, cualquier sistema de tratamiento digital debe ofrecer opciones para calcular estas estadísticas de la imagen, al menos de las medidas de tendencia central y dispersión más habituales. Estas medidas nos permitirán una primera valoración sobre el carácter de cada una de las bandas y su grado de homogeneidad. Las correspondientes a la imagen de Madrid aparecen en la tabla 6.1.

De esta tabla se deduce que la banda 1 ofrece, entre las visibles, el mayor desplazamiento de sus valores mínimos, lo que puede ser conse-

Tabla 6.1
Medidas estadísticas elementales sobre la imagen de Madrid

B	Mínimo	Máximo	Media	Desviación Típica	Mediana
1	64	255	106,46	19,15	105
2	25	165	52,55	12,93	52
3	18	202	67,27	19,91	67
4	10	185	76,34	16,25	76
5	4	255	123,06	31,88	125
6	123	205	171,55	9,75	172
7	2	255	62,12	18,89	62

cuencia del efecto de dispersión atmosférica[1]. Los valores medios son más altos para esa banda, junto a la 5, bastante saturada a juzgar por los valores mínimo y máximo, muy próximos a 0 y 255, respectivamente. La banda 5 acoge también la mayor heterogeneidad, con una desviación típica superior a 30 ND. Por su parte, la banda térmica ofrece un rango de variación muy pequeño, entre 123 y 205, con una desviación típica inferior a 10 ND. Lógicamente, estos valores numéricos se relacionan con los parámetros de calibración del sensor. Como resulta evidente, la banda 5 es la más sensible a alteraciones de radiancia, mientras la 6 y la 2 ofrecen el peor contraste en la escena.

Además de estos valores medios, también resulta de gran interés contar con el histograma de frecuencias de cada banda, puesto que nos informa sobre cómo se distribuyen los ND en una determinada escena. Con objeto de facilitar la representación del histograma, las frecuencias absolutas suelen convertirse a relativas, de acuerdo a una sencilla fórmula:

$$FR\,(ND_i) = \frac{F\,(ND_i)}{\Sigma\,(F(ND_i))} \times 100 \qquad [6.1]$$

Esto es, la frecuencia relativa de un determinado ND (p.ej. 123) se calcula como la proporción del número total de pixels de la imagen que cuentan con ese valor, frente al total de pixels. Esa proporción sirve para

[1] Recuérdese, de 2.8.2. que la dispersión Rayleigh, la más común, afecta principalmente a las longitudes de onda más cortas.

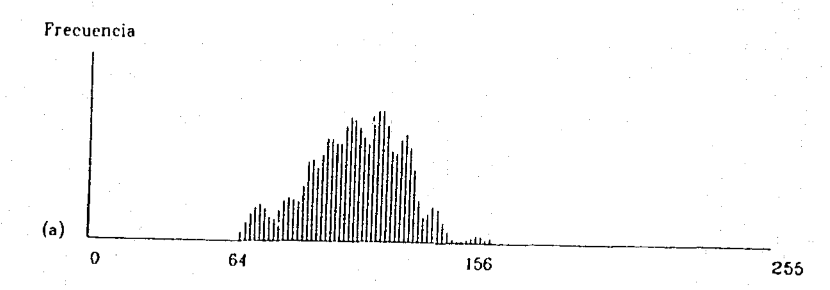
escalar el histograma, a partir de la frecuencia relativa mayor de la imagen.

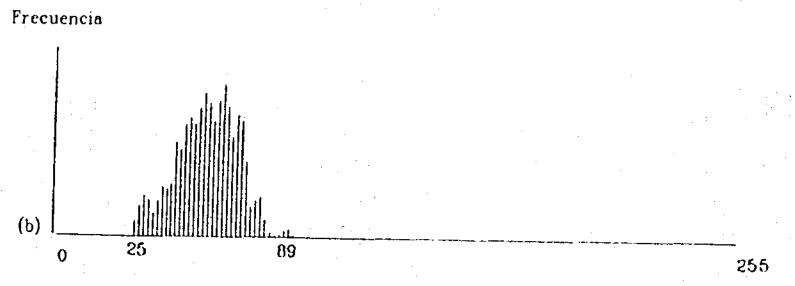
Varios autores han puesto de relieve el interés del histograma para realizar una primera valoración de la imagen (Jensen, 1986, pp. 69-72; Richards, 1986, pp. 84-85). La localización del histograma nos permite deducir el contraste presente en la imagen, mientras la presencia de picos relativos, puede ser testigo de determinadas clases de cobertura. Por ejemplo, para el caso de la imagen de Madrid, los histogramas de las bandas 1 a 4 (fig. 6.10) nos permiten realizar algunos comentarios interesantes. Por un lado, todos ellos ocupan sólo un pequeño margen del rango de variación ofrecido por el sensor, o, si se prefiere, por el equipo de visualización (0 a 255). Esto implica la conveniencia de ajustar, de alguna forma, la variación inicial a la máxima permitida, lo que supondrá una mejora del contraste (6.6.1). Entre las bandas aquí incluidas, la 1 y 3 ofrecen mayor dispersión, mientras la 2 presenta el menor rango. En cuanto al significado de los distintos picos de frecuencia, resulta muy complicado identificar las cubiertas que los originan, si bien algunos de ellos resultan más claros. Por ejemplo, el pequeño pico situado en los valores más bajos de la banda 4 puede indicar la presencia del embalse del Pardo, por cuanto el agua ofrece valores de absortividad muy altos en esta banda del espectro. Como puede observarse esa cúspide relativa también aparece, aunque menos marcada, en las bandas visibles.

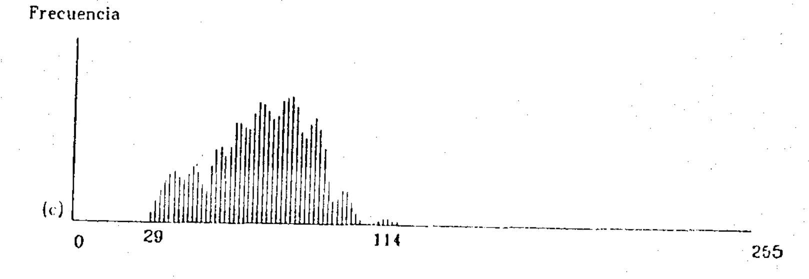
6.4.3. Utilidades para la visualización

La capacidad para la visualización de la imagen debe considerarse como una de las principales características de un equipo de tratamiento digital. Esa capacidad es dependiente del *hardware* disponible (6.3.1.3), y de las herramientas que ofrece el sistema para "dialogar" con el monitor gráfico. La relación, en este sentido, sería muy amplia, puesto que una de las tendencias de mayor desarrollo, en el momento presente, se dirige precisamente a construir sistemas mucho más transparentes de cara al usuario. En lo que se refiere al ámbito que nos ocupa, las utilidades de visualización más habituales son:

(i) Conversión digital-analógica de los ND almacenados en la imagen, lo que permite su representación en el monitor gráfico. El proceso técnico aplicado está fuera del alcance de este libro (Richards, 1986, apéndice F; Muller, 1988). Basta aquí indicar que supone convertir un valor numérico (el ND de cada pixel) en una señal analógica que se transmite a un tubo de rayos catódicos (CRT) para su representación visual. Con objeto de que la imagen visualizada se mantenga en el moni-







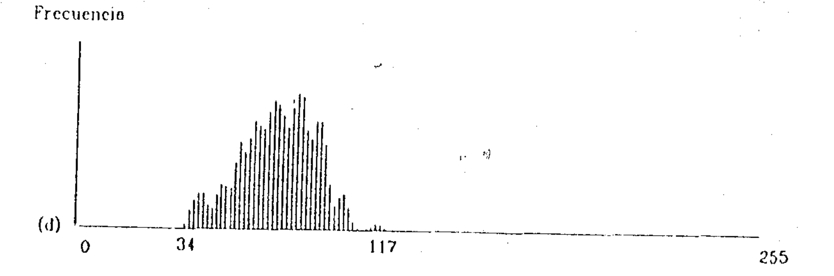


Fig. 6.10 - Histogramas correspondientes a la imagen de Madrid: (a) Banda 1, (b) Banda 2), (c) Banda 3 y (d) Banda 4

tor, existe un dispositivo intermedio, denominado memoria de refresco (*refresh buffer*), que almacena temporalmente los ND visualizados hasta que se envíe una nueva imagen al monitor. A partir de esa memoria intermedia, se produce un barrido del tubo de imagen, a un ritmo de 25 ó 30 veces por segundo, suficientemente alto para que no pueda apreciarse con el ojo humano. Habitualmente se cuenta con tres memorias de refresco, una para cada uno de los cañones de color (azul, verde y rojo) que forman la imagen.

(ii) Obtención de coordenadas. Con ayuda del digitizador o ratón electrónico, pueden obtenerse las coordenadas de distintos puntos de interés, de cara a la corrección geométrica de la imagen (6.5.3) o a la caracterización espectral de distintas cubiertas (6.8.2). Caso de que la imagen haya sido corregida cartográficamente, esas coordenadas coincidirán con la proyección utilizada (UTM, Lambert, etc.). La localización se facilita por la ayuda de un cursor móvil, normalmente en forma de cruz.

(iii) Digitización de áreas sobre la imagen, realizada también con la ayuda de un cursor móvil. Estas zonas pueden hacerse corresponder con campos de entrenamiento para la clasificación (6.8.2.2), o con sectores que pretenden aislarse de la imagen (máscaras). En similares términos cabe expresarse en lo que hace referencia a la inclusión de rótulos o simbología gráfica (encabezamientos, flechas de orientación, líneas, etc.)

(iv) Cambios de escala, especialmente en lo que se refiere a magnificaciones (6.6.5). En los sistemas más modernos, este proceso se realiza en la memoria de refresco, por lo que se obtiene instantáneamente. Además de aumentar el tamaño del pixel, el usuario puede desplazarse sobre la imagen a esa nueva escala (*pan, roll*), facilitando notablemente la localización de zonas de interés.

(v) Creación de ficheros de visualización. En muchas ocasiones resulta muy conveniente contar con una réplica de la información almacenada en el monitor. Esto se consigue gracias a una programa auxiliar que salva la memoria de refresco en el disco, permitiendo acceder en otro momento a una determinada representación. Esta opción es muy útil para salvar una composición de varias imágenes y/o rótulos en pantalla, sin necesidad de repetir todo el proceso que llevó a su creación.

6.5. CORRECCIONES DE LA IMAGEN

Con este nombre se indican aquellos procesos que tienden a eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen, ya sea en su localización, ya en los ND de los pixels que la componen. Estas operaciones tienden a disponer los datos en la forma más cercana posible a una adquisición

idónea, tanto en la posición de los pixels como en la radiancia que significan.

Algunas de las técnicas tratadas en este capítulo se incorporan de modo rutinario por las estaciones receptoras de las imágenes. Este es el caso de la red distribuidora europea EARTHNET, que aplica distintos niveles de corrección radiométrica y geométrica a las imágenes que solicitan los usuarios. En algunas ocasiones, estas correcciones bastarán para abordar un estudio de aplicación, por lo que el usuario puede obviar este capítulo. Sin embargo, en muchos otros casos se precisa abordar correcciones más detalladas. Los estudios multi-temporales, o la entrada de información auxiliar (suelos, vegetación, modelos digitales del terreno), son buenos ejemplos de este tipo de situaciones.

El término corrección, que da título a este capítulo, conviene manejarlo con ciertos matices, puesto que no todas las operaciones aquí incluidas pueden calificarse propiamente como correcciones de la imagen. Por corrección se entiende solventar algún defecto en la adquisición, emisión o recepción de la imagen. Sin embargo, algunos de los tratamientos aquí presentados, no se encaminan necesariamente a reconstruir la imagen idealmente detectada, sino más bien a disponerla más adecuadamente para su interpretación. Por ejemplo, la superposición de la imagen a un plano no sólo implica corregir los defectos de adquisición, sino también introducir otros nuevos, ya que cualquier proyección cartográfica deforma la superficie terrestre. En cualquier caso, son procesos útiles para abordar posteriores tratamientos.

6.5.1. Fuentes de error en una imagen espacial

Cualquier imagen adquirida por un sensor remoto, ya sea aéreo o espacial, presenta una serie de alteraciones radiométricas y geométricas debidas a muy variados factores. Esto explica que la imagen finalmente detectada no coincida exactamente con el tono-posición-forma-tamaño de los objetos que incluye. En el caso concreto de las imágenes espaciales, las deformaciones más frecuentes pueden agruparse en cuatro apartados (Bernstein, 1978; Mather, 1987):

(i) Distorsiones originadas por la plataforma. Pese a la gran estabilidad de un satélite de observación, muy superior a la que ofrece un avión, pueden producirse pequeñas variaciones en la altitud de su órbita, en su velocidad, o en la orientación de cualquiera de sus tres ejes: aleteo (*pitch*), cabeceo (*roll*), giro lateral (*yaw*). En el primer caso, se producen

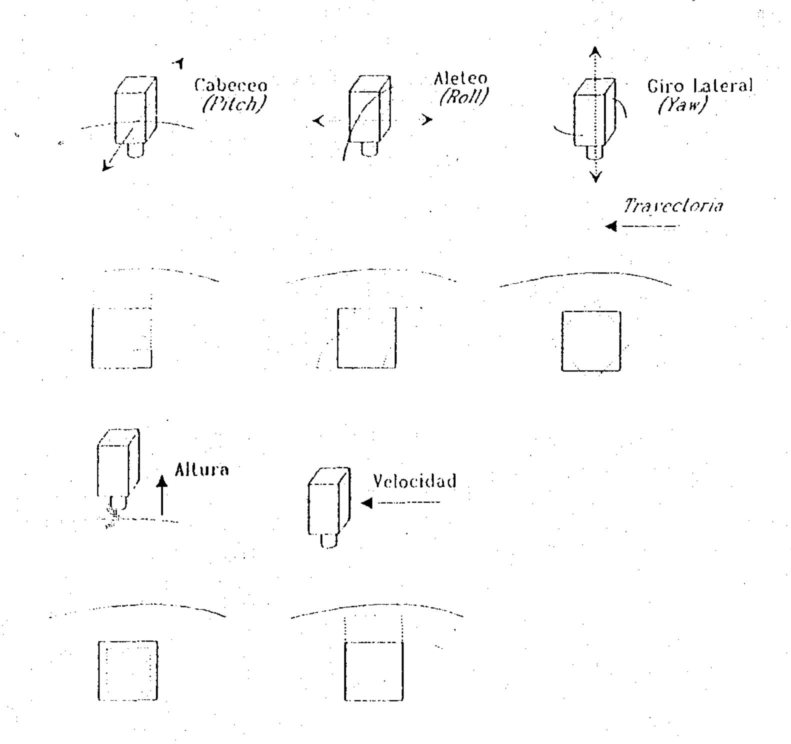


Fig. 6.11 - Fuentes de error geométrico en una imagen espacial

cambios en la escala de la imagen, mientras, en el segundo, distorsiones de distinto tipo en su geometría de adquisición (fig. 6.11). Ambos factores pueden considerarse como no sistemáticos, puesto que aparecen de forma esporádica y son, por ello, dificilmente predecibles y complejos de modelar (Welch y Usery, 1984)

(ii) Distorsiones provocadas por la rotación terrestre. Teniendo en cuenta la altitud orbital de las plataformas espaciales, el efecto de rotación de la tierra aparece claramente en la imagen. Por ejemplo, en el caso del MSS del satélite Landsat, cada imagen de 185 x 185 km se adquiere en 28 segundos, aproximadamente. En este lapso de tiempo, desde la primera a la última línea de barrido, la Tierra se ha desplazado sensiblemente (unos 8 km en nuestras latitudes), lo que causa, junto a la propia inclinación de la órbita, una orientación de la imagen Noreste-Suroeste.

(iii) Distorsiones provocadas por el sensor. Como ya se analizó anteriormente (3.3.2), los sensores de barrido electrónico realizan una exploración perpendicular a la trayectoria del satélite, gracias a un espejo

oscilante que envía la radiancia detectada a una cadena de detectores sólidos. Este movimiento de barrido puede alterarse por anomalías del sensor, provocando un efecto de barrido no lineal o cambios en el intervalo de recogida de información. El ángulo con el que se realiza ese barrido tiene también un importante efecto sobre la geometría de adquisición. En caso de sensores con un amplio campo de visión (NOAA-AVHRR o Meteosat, por ejemplo), se produce una distorsión panorámica, tanto mayor cuanto más nos alejamos del nadir. Asimismo, la escala de la imagen puede variar significativamente hacia los extremos. Cuando se trata de sensores con menor campo de visión (Landsat-MSS, TM ó SPOT-HRV), estos efectos son de menor calibre.

Otro problema frecuente que plantea el sensor es la falta de calibración entre detectores. En los sensores de barrido la exploración se realiza en varias líneas simultáneamente, por lo que requieren varios detectores por banda. Resulta muy importante que todos ellos traduzcan uniformemente la señal detectada, con objeto de que la misma radiancia recibida no se codifique en ND distintos. En ocasiones ese ajuste entre detectores se deteriora, provocándose un efecto de bandeado en la imagen final, especialmente perceptible en las zonas de baja radiancia (sombras, superficie marina). Para el caso de los equipos de exploración por empuje (3.3.3), el problema de calibración es aún mayor, ya que cuentan con un gran número de detectores por línea (6.000 para el canal pancromático del HRV). En este caso, un mal ajuste supondría un bandeado longitudinal en la imagen resultante. Más evidente todavía, resultan los fallos momentáneos de alguno de los detectores, ya sea en la emisión, ya en la recepción de la señal. Esto provoca la pérdida de una serie de líneas o pixels en la imagen final.

(iv) Distorsiones provocadas por la atmósfera. Los distintos elementos que componen la atmósfera causan, como ya se comentó en 2.8, una modificación de la radiancia original proveniente de la superficie terrestre. El efecto más importante es el de dispersión, provocado por la presencia de aerosoles, gases y vapor de agua, que implica un aumento de la señal recibida por el sensor. Este efecto es más sensible en las longitudes de onda cortas, que tienden a presentar un menor contraste entre coberturas de similar comportamiento radiométrico.

Algunos de estas problemas se solventan rutinariamente en los centros encargados de la recepción o venta de las imágenes. Otros, sin embargo, persisten, haciendo precisas una serie de técnicas de ajuste. Por ejemplo, las correcciones radiométricas son vitales para modelar parámetros físicos a partir de la imagen, o para abordar estudios multi-temporales. En este último caso, también son necesarias las correcciones geométricas, así

como siempre que se pretenda relacionar la imagen con algún tipo de información auxiliar.

6.5.2. Correcciones radiométricas

Este es un término muy genérico, que designa aquellas técnicas que modifican los ND originales, con objeto de acercarlos a los que habría presentes en la imagen caso de una recepción ideal. Dentro de este concepto se engloban las distorsiones provocadas por la atmósfera, así como los problemas radiométricos derivados del mal funcionamiento del sensor. Se ha incluido, por último, un epígrafe que aborda la conversión entre ND de la imagen y parámetros físicos (radiancia y reflectividad), en cuanto que también supone una transformación de los ND originales.

6.5.2.1. Restauración de líneas o pixels perdidos

Un mal funcionamiento del sensor o de la antena receptora de la imagen, puede llevar a que ésta aparezca con algunas líneas o pixels perdidos. En una visualización de la imagen, ésta presentaría una serie de líneas anómalas (negras o blancas), o incluso una serie de pixels aislados de similar aspecto. En ambos casos, se trata de información irreparablemente perdida. No puede restaurarse lo que nunca se obtuvo. En consecuencia, los procesos de corrección se dirigen aquí a mejorar artificialmente el aspecto visual de la imagen, facilitando su posterior interpretación.

Puesto que se trata de pixels perdidos, la forma más lógica de estimar sus ND estriba en considerar los ND de los pixels vecinos. De acuerdo al conocido fenómeno de la auto-correlación espacial, muchas variables nos tienden a presentar una fuerte asociación en el espacio. La probabilidad de que aparezca una precipitación similar a la de una determinada estación, por ejemplo, es muy alta en estaciones cercanas, reduciéndose según nos alejamos de aquella. De igual forma, los valores de radiancia provenientes de una parcela de la superficie terrestre tienden a estar positivamente correlacionados con los provenientes de parcelas vecinas (Campbell, 1981). Por ello, parece razonable estimar los ND de las líneas perdidas a partir de los ND de las inmediatas. Este criterio de vecindad puede introducirse de distintas formas. La más sencilla es sustituir el ND de cada línea/pixel por el de los precedentes:

$$ND_{i,j} = ND_{i-1,j} \qquad [6.2]$$

donde $ND_{i,j}$ corresponde al nivel digital del pixel de la línea **i** (la defectuosa) y columna, j, y $ND_{i-1,j}$, indica el nivel digital del pixel situado en la línea precedente. También podría incluirse i+1, para sustituir las líneas defectuosas por las posteriores.

Un segundo método de sustitución promedia los valores de las líneas anterior y posterior a la defectuosa. Esto es:

$$ND_{i,j} = \text{ent}\ \{(ND_{i-1,j} + ND_{i+1,j})/2\} \qquad [6.3]$$

en donde ent { } indica que el resultado de la operación debe convertirse en el número entero más cercano. De acuerdo con Mather (1987), este segundo método resulta más arriesgado que el primero, sobre todo en aquellos casos en donde es menos claro asumir una auto-correlación espacial.

Un tercer método de recuperar la información perdida utiliza una banda auxiliar, altamente correlacionada con la que presenta problemas. A partir de esta banda auxiliar, se estima el valor de los pixels defectuosos de la forma siguiente (Bernstein et al, 1984):

$$ND_{i,j,k} = (s_k / s_r)\ \{ND_{i,j,r} - (ND_{i,j+1,r} + ND_{i,j-1,r})/2\} + (ND_{i,j+1,k} + ND_{i,j-1,k})/2 \qquad [6.4]$$

donde s_k y s_r son, respectivamente las desviaciones típicas de la banda a restaurar "k" y la banda auxiliar "r". Al igual que en el caso anterior, el resultado debería convertirse al valor entero más cercano.

En cualquiera de los tres algoritmos [6.2 a 6.4], se asume que las líneas defectuosas ya han sido localizadas. Esto puede ser trivial en algunos casos, pero en otros resulta bastante compleja. Por ello, puede emplearse un método de búsqueda automática, que parte de comparar la media aritmética de cada línea con la de las líneas anterior y posterior. Si difiere de ellas significativamente, esto es por encima de un determinado umbral, se realiza un estudio más detallado de los valores que la componen, con objeto de detectar los anómalos (0 ó 255, por ejemplo). Si éstos aparecen, se considera que aquella línea está afectada por algún tipo de error y se aplican sobre ella alguno de los algoritmos anteriores.

6.5.2.2. Corrección del bandeado de la imagen

En algunas imágenes obtenidas por equipos de barrido secuencial (MSS o TM), se observa un bandeado de la imagen, especialmente

perceptible en las zonas de baja radiancia (grandes embalses, mar). Este bandeado, conocido como *striping* en la terminología anglosajona, se debe a un mal calibrado entre los detectores que forman el sensor; esto es, a que alguno de ellos codifique la radiancia que recibe en ND superiores o inferiores al resto. Como se vio anteriormente, los equipos de barrido multi-espectral exploran varias líneas simultáneamente a cada oscilación del espejo. Caso de que los detectores presenten inconsistencias, aparecerán en la imagen unas líneas más oscuras o claras que el resto. El efecto, además, es periódico, ya que cada detector registra 1 de cada **p** líneas, siendo **p** el número de detectores por banda. En el caso del sensor MSS, se registran 6 líneas simultáneamente, mientras este número se eleva a 16 para el TM.

Para ajustar digitalmente la señal detectada por cada uno de los detectores, se asume que todos ellos, caso de estar bien calibrados, tenderían a presentar similares histogramas. Basta, por tanto, recomponer el histograma de cada detector, calculando independientemente la frecuencia de los **p** grupos de líneas (fig. 6.12). Por ejemplo, caso de trabajarse sobre una imagen MSS, con seis detectores por banda, se calcularía, por un lado, el histograma de las líneas 1, 7, 13, 19, 25..., esto es, las recogidas por el primer detector; por otro, el correspondiente a las líneas 2, 8, 14, 20, 26...(segundo detector), y así sucesivamente hasta completar los seis detectores.

El paso siguiente intenta ajustar esos histogramas de cada detector a otro que se elija como referencia. Lo más habitual es que el histograma de referencia sea el del conjunto de la imagen, esto es el formado por todas las líneas que la componen. La forma más sencilla de realizar el ajuste se basa en aplicar unos coeficientes lineales (sesgo y ganancia) a los histogramas de cada detector, con objeto de igualar sus medias y desviaciones típicas con las que ofrece el histograma de referencia. Aunque existen otros procedimientos no lineales (considerando el histograma acumulativo), el método lineal rinde, en la mayor parte de los casos, buenos resultados.

Su proceso parte de calcular la media y desviación típica de cada histograma parcial; esto es, del correspondiente a los pixels codificados por un determinado detector. Posteriormente, para ajustar estos valores a los encontrados para el histograma de referencia basta aplicar:

$$a_i = s / s_i \quad [6.5]$$

y

$$b_i = \overline{ND} - a_i \, \overline{ND_i} \quad [6.6]$$

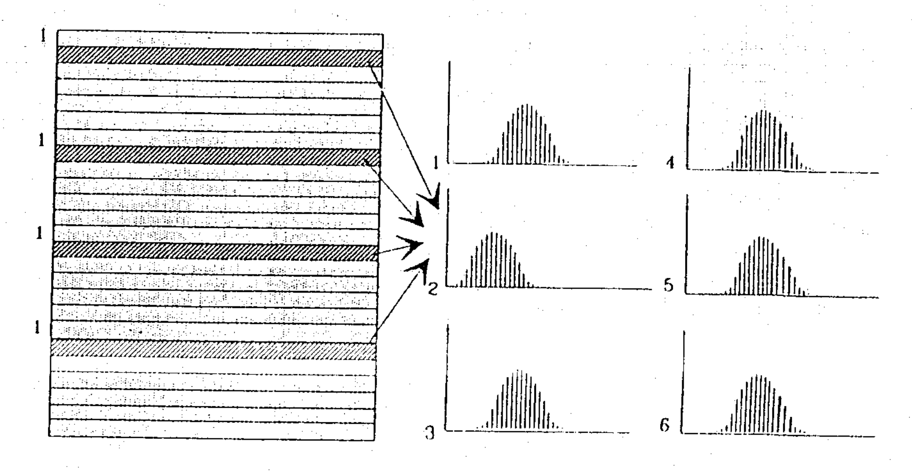


Fig. 6.12 - Histograma de los distintos detectores para la corrección del bandeado de la imagen

donde s y s_i indican las desviaciones típicas del histograma de referencia y del parcial, respectivamente; ND y ND_i, los ND medios para ambos, y a_i y b_i los coeficientes de ajuste. A partir de estos coeficientes puede calcularse el valor corregido, aplicando una sencilla función:

$$ND_{ij}' = a_i \, ND_{ij} + b_i \quad [6.7]$$

en donde el ND de salida se calcula a partir de aplicar unos coeficientes de ajuste al ND de entrada. Para reducir el volumen de cálculos, este algoritmo suele aplicarse empleando una técnica muy similar a las tablas de color (LUT) que veremos más adelante (6.6.1.2). Por cuanto, el ND de salida sólo puede presentar un valor entre 0 y 255, se trata de crear una tabla con todas las posibles soluciones a la transformación vista en [6.7]. En ella se dispone, para cada ND de entrada, el que corresponde al de salida, con tantas columnas como detectores forman el sensor. Basta, posteriormente, con acudir a esta tabla de referencia, en lugar de realizar las transformaciones para cada pixel.

6.5.2.3. Corrección atmosférica

Como ya tuvimos ocasión de comentar en el capítulo 2, la radiación electromagnética se ve notablemente afectada por los distintos componentes de la atmósfera. La presencia de aerosoles y vapor de agua

dispersa de una forma selectiva la radiación transmitida entre la superficie terrestre y el sensor. Por ello, la radiancia finalmente detectada por éste no corresponde exactamente a la que parte de la superficie terrestre, sino que cuenta con un porcentaje añadido, a consecuencia del efecto dispersor de la atmósfera.

El principal problema que implica esta dispersión es su carácter heterogéneo, en el espacio y en el tiempo. En otras palabras, la dispersión atmosférica no es constante en la imagen sino, que determinadas zonas pueden haber sido más afectadas que otras, en función de la diversa presencia de aerosoles o vapor de agua. Además, el efecto es dependiente de la longitud de onda, y varía entre imágenes de forma difícil de predecir. Desgraciadamente, resulta muy complejo abordar una corrección rigurosa de la dispersión atmosférica, por cuanto requiere una serie de medidas simultáneas a la adquisición de la imagen.

Pese a estas dificultades, es preciso realizar, al menos, una estimación del efecto atmosférico. Esta corrección será muy interesante en tres tipos de situaciones: (i) cuando pretendan realizarse combinaciones lineales entre bandas (6.7), puesto que el efecto de dispersión, como ya vimos, es distinto en función de la longitud de onda; (ii) cuando intenten establecerse modelos que pongan en relación los ND con determinados parámetros físicos: temperatura, biomasa, humedad del suelo, clorofila en el agua, etc., y (iii) cuando se realicen estudios multi-temporales, puesto que la dispersión sufrida por una imagen no es comparable a la que experimenta otra adquirida en distinta fecha.

Entre los métodos propuestos para corregir el aporte de radiancia atmosférica, uno de los más sencillos es el ideado por Chavez, que se denomina corrección del histograma por sus valores mínimos (*Histogram Minimum Method*, HMM: Campbell, 1987). Se asume que las áreas cubiertas con materiales de fuerte absortividad (agua, zonas en sombra), deberían presentar una radiancia espectral muy próxima a cero. En la práctica, el histograma de los ND de la imagen siempre presenta un mínimo superior a ese valor, que se atribuye al efecto de dispersión atmosférica. Como vimos anteriormente en la imagen de Madrid, ese valor mínimo es mayor en las bandas más cortas, disminuyendo hacia el infrarrojo cercano y medio. También se vio anteriormente (2.8.2) que la dispersión Rayleigh, la más común, afecta principalmente a las longitudes de onda más cortas, lo que confirma que ese valor mínimo puede corresponder más al efecto de la atmósfera que a la radiancia espectral proveniente de la superficie terrestre. En consecuencia, una sencilla aproximación a la corrección atmosférica consiste en restar a todos los

ND de cada banda el ND mínimo de esa misma banda, situando el origen del histograma en cero:

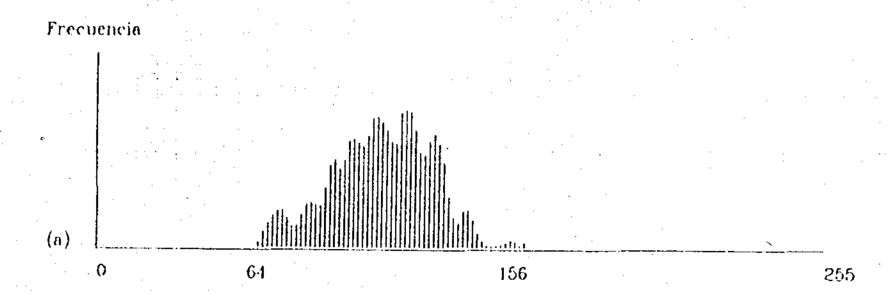
$$ND_{i,j,k}' = ND_{i,j,k} - ND_{min,k} \qquad [6.8]$$

esto es, el ND del pixel (i,j) en la banda k, se ajusta restándole el ND mínimo de esa misma banda.

Recientemente el mismo autor ha sugerido un método más avanzado de corrección, basado sobre éste pero teniendo en cuenta que la dispersión tiende a estar correlacionada entre bandas (Chavez, 1988; Chavez, 1989). Se basa en establecer una banda de referencia, la que se supone más afectada por la dispersión (TM-1 ó MSS-4, será lo más habitual). A partir del valor mínimo de esa banda, se calcula una corrección atmosférica para el resto de las bandas teniendo en cuenta dos parámetros: (i) los valores de calibración de cada banda, y (ii) una estimación de las condiciones atmosféricas en el momento de adquisición de la imagen. Chavez aporta cinco modelos atmosféricos: muy claro (*very clear*), claro (*clear*), moderado (*moderated*), brumoso (*hazy*) y muy brumoso (*very hazy*), que son estimados por el usuario sobre información de campo o sobre un examen de la importancia del valor mínimo en cada una de las bandas. El autor aporta una serie de tablas para el trabajo con imágenes adquiridas por el sensor TM.

El método de Chavez se ha aplicado a una sub-imagen de la zona de Madrid seleccionada previamente. Se ha designado como referencia la banda 1, y el modelo atmosférico 'muy claro', de acuerdo a las condiciones climáticas en el momento de adquisición de la imagen. En la figura 6.13a aparece el histograma original correspondiente a esta banda. Como puede apreciarse, está severamente desplazado del origen, con un mínimo de 64, valor medio de 104,31 y desviación típica de 15,89. El resto de las bandas visibles presentan un menor desplazamiento: la banda 2, por ejemplo, ofrece un valor mínimo de 26, media de 48,26 y desviación típica de 10,26.

- La corrección parte del ND mínimo de la banda 1 (64), sobre la que se descuenta el factor de sesgo del sensor (-2,58). Esto reduce la corrección de esa banda a restar a todos los ND de la misma la cifra 61,42 (fig. 6.13b). Sobre este valor, se estima la dispersión que afecta al resto de las bandas, a partir de un factor multiplicativo, en función del modelo de dispersión elegido (muy claro, en este caso), y otro de ganancia (de acuerdo a la correlación entre los detectores de las distintas bandas). Fruto de ello, resulta una dispersión atmosférica estimada para



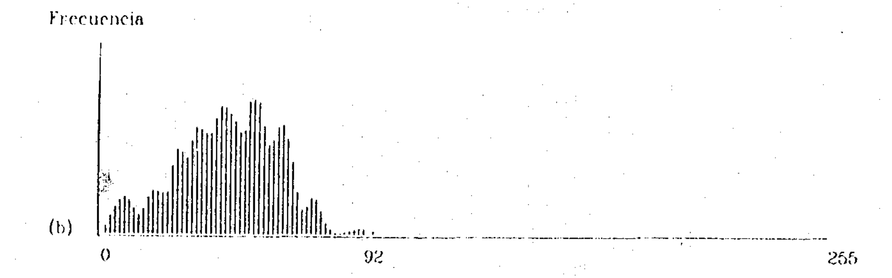


Fig. 6.13 - Corrección atmosférica por el método del valor mínimo

las bandas 2 y 3, de 20,085 y 13,539 respectivamente. La figura 6.14* recoge una composición en color natural de la imagen original y de la corregida. Como puede fácilmente apreciarse, la imagen original ofrece un contraste bastante pobre, afectado principalmente por la fuerte influencia del color azul, que se mejora notablemente en la imagen corregida. La transformación aplicada, resulta asimismo muy interesante para realizar ratios o índices de vegetación, a partir de la combinación lineal de bandas (6.7.2).

Otro procedimiento dirigido a suprimir la dispersión atmosférica, se basa en una regresión entre bandas. Se parte de delimitar sobre la imagen unas zonas de baja radiancia (sombras, aguas claras y profundas). Posteriormente se obtienen los ND de los pixels incluidos en esas áreas, para cada una de las bandas que intervienen en el análisis. A partir de esos valores, se calcula la línea de regresión entre cada banda y una de ellas, en donde la dispersión sea menos intensa (típicamente la banda situada en el infrarrojo medio, por ejemplo TM7). Esta recta de regresión debería pasar a través del origen del eje de coordenadas formado por las dos bandas. En caso contrario, se supone que el desplazamiento de la recta es debido a la dispersión, por lo que basta

conocer el punto en el que ésta corta al eje de la banda a corregir. Ese valor se sustrae a todos los ND de dicha banda, de modo similar al método anterior.

Para el caso de estudios multi-temporales, la corrección atmosférica puede abordarse de modo relativo. Esto es, basta normalizar los ND de distintas escenas a otra, que se elige como referencia. El método se basa en determinar la reflectividad aparente para una serie de cubiertas que no cambian entre fechas (asfalto, aguas claras y arena). A partir de esos valores, pueden estimarse unos coeficientes de sesgo y ganancia que permitan corresponder los ND entre fechas distintas, soslayando el efecto atmosférico (Caselles y López, 1989). El método se ensayó con buenos resultados en un estudio multi-temporal sobre la Albufera de Valencia, comparándolo con el modelo de corrección atmosférica de Tanré y colaboradores (Tanré et al, 1986).

6.5.2.4. Conversión de ND a parámetros físicos

La mayor parte de los métodos de análisis de imágenes se han basado en considerar a los ND como medidas radiométricas relativas. Dicho de otro modo, la interpretación ha tratado de establecer las diferencias entre un tipo de cubierta y otro, y no tanto en caracterizar de forma absoluta a esa cubierta. La cuestión fundamental, en este planteamiento, es cómo se discrimina cada categoría de interés, para una imagen y en una fecha concreta. Los resultados no son, por tanto, extrapolables a otros ámbitos o períodos.

Este tipo de acercamiento es válido cuando se pretende realizar una cartografía temática de un territorio; esto es, cuando el resultado final del análisis es un mapa que recoge la distribución de una serie de categorías, mutuamente excluyentes, en el espacio. Ahora bien, si se pretenden realizar mediciones del contenido de humedad en la vegetación o de su biomasa, es preciso establecer una relación cuantitativa entre los ND de la imagen y los parámetros antes aludidos.

Esta línea de trabajo puede seguirse por dos conductos: por un lado, poner en relación directa los ND de la imagen con medidas de campo a partir de modelos de regresión; por otro, convertir los ND a parámetros físicos, directamente relacionados con las variables antes aludidas. Si esa conversión fuera abordable, podrían estimarse parámetros de gran interés para el medio natural con escaso control del terreno. En definitiva, sería factible extrapolar las conclusiones de un estudio a otros ámbitos o

períodos de observación, quedando relegados a un plano secundario los trabajos de campo.

El principal problema que plantea esta segunda alternativa es la complejidad para modelar todos los factores que intervienen en la señal detectada por el sensor. Como ya vimos en el capítulo 2, esta señal no sólo es una función de la cubierta terrestre, sino también de otros elementos ajenos: atmósfera, condiciones de observación, tipo de sustrato, fecha de adquisición, etc. Ante la dificultad de aislar todos estos aspectos, se opta normalmente por realizar medidas relativas dentro de una determinada imagen.

En cualquier caso, conviene tener presente que los ND de la imagen pueden transformarse en parámetros físicos, quedando abierta la vía a una medición más absoluta a partir de estos valores. Además de este objetivo, la conversión en valores de reflectividad cubre otros fines: permite realizar, con mayor rigor, los ratios entre bandas (6.7.2); dar un significado físico a la definición espectral de las clases temáticas, y poner en relación imágenes adquiridas en distintas fechas y/o por distintos sensores (Robinove, 1982).

Desgraciadamente la conversión no resulta todo lo precisa que sería de desear, especialmente por la dificultad para valorar el componente atmosférico. Pese a ello, se indican las líneas directrices para abordar esa transformación (fig. 6.15).

El proceso se inicia a partir de los ND grabados en la cinta. Como sabemos, esos ND son traducciones digitales de la radiancia espectral detectada por el sensor. Por tanto, pueden convertirse de nuevo a valores de radiancia a partir de los coeficientes de calibración del sensor:

$$L_{sen,k} = a_{0,k} + a_{1,k}\, ND_k \qquad [6.9]$$

donde $L_{sen,k}$, corresponde a la radiancia espectral recibida por el sensor en la banda k (en W / m² sr μm); $a_{0,k}$ y $a_{1,k}$ son los coeficientes de calibración para esa banda, y ND_k, corresponde al nivel digital de la imagen en la misma banda. Estos coeficientes de calibrado suelen incluirse en la cabecera de la CCT. En la tabla 6.2 aparecen los correspondientes al sensor TM.

Conviene considerar que la radiancia detectada por el sensor ($L_{sen,k}$) depende de varios factores. Principalmente es una función de la radiación solar incidente, de la respuesta de la cubierta terrestre a dicha

(1) CONVERSION ND EN CINTA A RADIANCIA DEL SENSOR ($L_{sen,k}$)

$$L_{sen,k} = a_{0k} + a_{1k} ND_k$$

(2) CONVERSION RADIANCIA DEL SENSOR A REFLECTIVIDAD

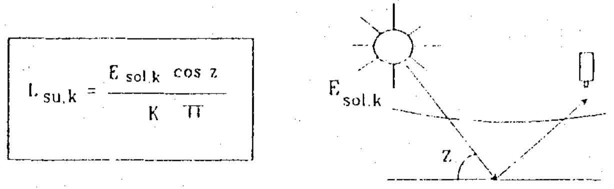
(2.1) ESTIMACION DE RADIANCIA DEL SENSOR

$$L_{sen,k} = L_{su,k}\, \rho_k\, T_k + L_{a,k}$$

$$\rho_k = \frac{L_{sen,k} - L_{a,k}}{L_{su,k}\, T_k}$$

(2.2) ESTIMACION DE RADIANCIA EN EL SUELO

$$L_{su,k} = \frac{E_{sol,k} \cos z}{K\ \pi}$$



(2.3) CORRECCION ATMOSFERICA

$$\rho_k = \frac{K\ \pi\ L_{sen,k}}{E_{sol,k} \cos z}$$

Fig. 6.15 - Conversión de ND a valores de reflectividad

radiación, y del aporte de radiancia debida a la atmósfera. En suma, podemos expresar (Mather, 1987, p. 145):

$$L_{sen,k} = L_{su,k}\, \rho_k\, \tau_k + L_{a,k} \qquad [6.10]$$

esto es, la radiancia detectada por el sensor, es una función de la proveniente del sol, en esa banda del espectro, tal y como se mide en el suelo ($L_{su,k}$); de la reflectividad espectral de la cubierta (ρ_k), de la transmisividad de la atmósfera (τ_k), y de la radiancia aportada por la

Tabla 6.2
Parámetros empleados para la conversión de Niveles Digitales TM a valores de reflectividad

Banda	a_0	a_1	E_0 (W / m²)
1	-0,06662095	0,04197408	138,25
2	-0,15732250	0,10345120	139,04
3	-0,11269370	0,06499743	89,1
4	-0,23285630	0,11705160	147,7
5	-0,08640033	0,02726504	44,6
7	-0,05113922	0,01692211	21,33

Fuente: Gilabert et al, 1986

dispersión atmosférica ($L_{a,k}$). A partir de esa fórmula puede despejarse la reflectividad:

$$\rho_k = \frac{L_{sen,k} - L_{a,k}}{L_{su,k}\,\tau_k} \qquad [6.11]$$

Por otro lado, asumiendo que la superficie tenga un comportamiento lambertiano, podemos estimar la radiancia que llega al suelo, en la fecha concreta de adquisición de la imagen, a partir de los siguientes parámetros:

$$L_{su,k} = \frac{E_{0,k}\cos\theta}{K\,\pi} \qquad [6.12]$$

donde $E_{0,k}$ es la irradiancia solar extraterrestre (en esa banda del espectro), θ es el ángulo cenital, y K es el factor corrector de la distancia Tierra-Sol, calculado como: $1 + 0.0167 (\text{sen}(2\pi (\text{día} - 93.5) / 365))^2$. Los valores de la irradiancia solar para las bandas del sensor TM figuran en la tabla 6.2. A partir de las fórmulas anteriores, podemos calcular la reflectividad de la cubierta como:

$$\rho_k = \frac{L_{sen,k} - L_{a,k}}{\dfrac{E_{0,k}\cos\theta}{K\,\pi}\,\tau_k} \qquad [6.13]$$

y, si prescindimos de la influencia atmosférica, obtenemos la fórmula simplificada:

$$\rho_k = \frac{K\,\pi\,L_{sen,k}}{E_{0,k}\cos\theta} \qquad [6.14]$$

En resumen, el proceso de traducción de ND a parámetros físicos se ejecuta en tres fases: (i) corrección atmosférica de la imagen (6.5.2.3); (ii) conversión de ND a valores de radiancia ($L_{sen,k}$), a partir de los coeficientes de calibrado del sensor; (iii) estimación de valores de reflectividad (ρ_k), conociendo la fecha (K y el ángulo θ). Este proceso resulta simple, pero adecuado para algunas funciones, como sería la realización de ratios (6.7.2) o la normalización de radiancias en estudios multi-temporales (6.8.3.3.4).

En el caso de la imagen de Madrid, con la que venimos trabajando, si asumimos la corrección atmosférica previamente efectuada, podemos aplicar la fórmula [6.14] para traducir los ND originales en valores de reflectividad. En primer lugar, resulta preciso convertir los ND a valores de radiancia del sensor ($L_{sen,k}$), de acuerdo a los coeficientes que incluye la tabla 6.2. Por ejemplo, para la banda 1, el cálculo sería:

$$L_{sen,1} = -0{,}06662 + 0{,}04197\ ND_1$$

A partir de ese valor de radiancia, puede estimarse la reflectividad, conociendo K y θ. Para el dia de obtención de la imagen (2 de Agosto de 1984), el ángulo de elevación solar θ era 40° ($\cos\theta = 0{,}766$), y el factor K equivalía a 1,03. En consecuencia, la fórmula [6.14] se convertiría en:

$$\rho_1 = \frac{1{,}03\,\pi\,(-0{,}0662 + 0{,}04197\ ND_1)}{138{,}25 \times 0{,}766}$$

6.5.3. Correcciones geométricas

Este concepto incluye cualquier cambio en la posición que ocupan los pixels de la imagen. Por contraposición con las correcciones radiométricas, aquí no se pretende modificar los ND de los pixels de la imagen, sino sólo su posición, sus coordenadas. Gracias a tratarse de un formato digital, esta transformación puede basarse en funciones numéricas, que

permiten modificar muy flexiblemente la geometría de la imagen. La expresión general de este tipo de funciones sería:

$$f(x) = f_1\,(c,l)$$
$$f(y) = f_2\,(c,l)$$

Esto es, las coordenadas x, y de la imagen corregida son función de las coordenadas *c, l* (columna, línea) de la imagen de entrada. Esta transformación puede emplearse tanto para corregir cartograficamente una imagen, como para superponer dos o más imágenes entre sí. En el primer caso, se pretende transformar coordenadas de la imagen en coordenadas cartográficas (UTM u otras proyecciones), con objeto de que la imagen resultante pueda superponerse sobre mapas convencionales. En el segundo, se busca ajustar dos o más imágenes entre sí, normalmente con objeto de realizar estudios multi-temporales.

Sea una u otra la finalidad, las modificaciones geométricas de la imagen pueden abordarse con dos orientaciones. La primera de ellas parte de la información disponible sobre las características orbitales del sensor. Esto permite corregir los errores sistemáticos, como son los derivados de la rotación terrestre o de la inclinación de la órbita, a partir de modelar teóricamente su influencia en la imagen final (Richards, 1986; Mather, 1987). Por cuanto se trata de correcciones sistemáticas, pueden abordarse con escasa información del terreno, por lo que son idóneas para aquellas zonas del mundo donde la cartografía disponible es escasa o inadecuada. Asímismo, son convenientes para el caso de sensores de baja resolución (tipo AVHRR), en donde resulta muy complejo identificar puntos comunes entre imágenes y mapa.

La segunda alternativa de corrección es más empírica. Parte, bien de una cartografía básica a la que se pretende ajustar la imagen, bien de otra imagen que se considera como referencia. En ambos casos, la corrección se realiza en tres fases (fig. 6.16): (i) localización de puntos comunes a la imagen y al mapa (o a otra imagen de referencia), (ii) cálculo de las funciones de transformación entre las coordenadas de la imagen y las del mapa, y (iii) transferencia de los ND originales a la nueva posición, definida por la transformación previa.

6.5.3.1. Establecimiento de puntos de control

Para calcular cualquier función entre dos o más variables, es necesario contar previamente con una serie de observaciones comunes a todas ellas.

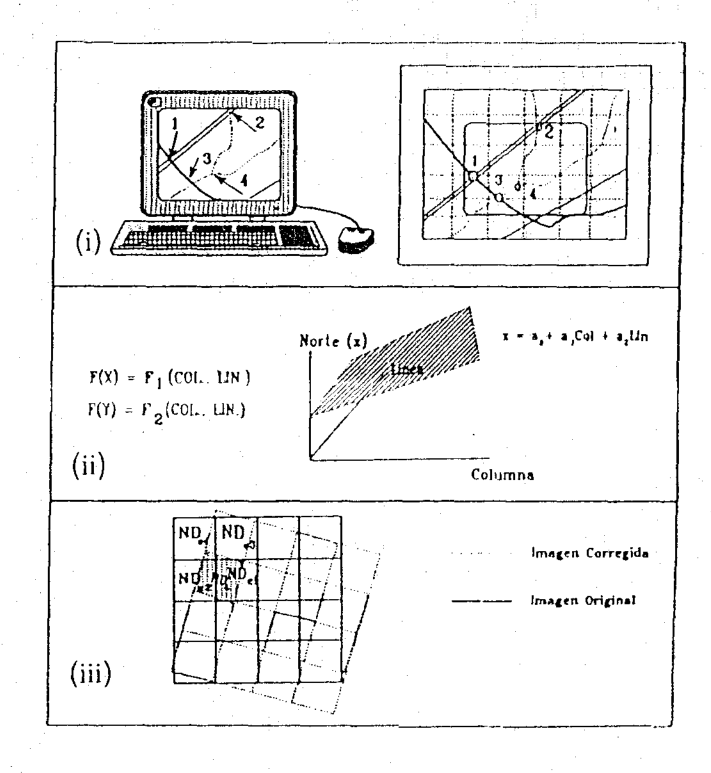


Fig. 6.16 - Fases del proceso de corrección geométrica

De la misma forma, las funciones que permiten transformar coordenadas de la imagen al mapa precisan localizar una serie de puntos de control entre la imagen y el mapa. A partir de las coordenadas de esos puntos, puede estimarse una función que relacione ambos documentos. Por cuanto las funciones se estiman a partir de esa muestra de coordenadas, la calidad del ajuste dependerá de la precisión con que se localicen esos puntos. De lo contrario, la estimación resultará sesgada. En definitiva, el establecimiento de puntos de control resulta la fase más crucial del proceso de corrección, y la que demanda mayor dedicación humana.

Para que el ajuste entre imagen y mapa sea correcto, se requiere atender a tres aspectos en la selección de los puntos de control: (i) número, (ii) localización, y (iii) distribución.

El número idóneo de puntos de control depende del tamaño y la complejidad geométrica de la imagen. Si las deformaciones que presenta son importantes, conviene aplicar funciones de transformación complejas, con polinomios de segundo o tercer grado. Cuanto mayor sea el grado de la ecuación de ajuste, se precisa también un mayor número de puntos de control. Matemáticamente sólo son necesarios 3 puntos para una función de ajuste de 1er grado, 6 para una de 2º grado y 10 para una de 3er grado. Ahora bien, conviene superar con creces ese listón mínimo para garantizar un buena conformidad entre imagen y mapa. Bernstein (1978) aconseja seleccionar entre 14 y 20 puntos para corregir una imagen MSS, mientras el *National Remote Sensing Center* inglés utiliza de 100 a 120 puntos para hacer lo propio con una imagen TM (Davison, 1984). Para una zona pequeña (512 x 512 pixels, por ejemplo), 10 ó 12 puntos y una corrección de primer grado serán normalmente suficientes. En caso de que el contraste topográfico sea importante, convendrá seleccionar un mayor número de puntos, y acudir a polinomios de transformación más complejos.

En cuanto a la localización, se recomienda que sean puntos claramente identificables en la imagen y en el mapa, preferiblemente rasgos humanos del paisaje no sujetos a dinamismo temporal: cruces de carreteras, presas, vías de ferrocarril, etc. No conviene señalar puntos en la línea de costa, pues el efecto de la marea puede modificar la localización exacta de un accidente geográfico. La misma idea puede aplicarse a los cursos de agua o embalses, que sufren alteraciones estacionales, en ocasiones de gran importancia. Algún elemento destacado de la vegetación podría utilizarse como punto de control, siempre que se disponga de la cartografía temática apropiada y no se hayan producido cambios entre la fecha de la imagen y la del mapa. Los programas más modernos de corrección geométrica facilitan la localización interactiva de estos puntos de control, con ayuda del digitizador o ratón electrónico. Conviene seleccionar sólo aquellos puntos claramente identificables sobre el mapa y la imagen. En caso de que se pretenda el registro de dos imágenes, alguno de estos programas permite visualizar ambas simultáneamente, facilitando mucho el proceso de selección.

Respecto a la distribución, conviene que los puntos de control se sitúen uniformemente sobre todo el territorio abarcado en la imagen. Esto evitará errores debidos a una ponderación excesiva de algún sector del área de estudio. La norma es especialmente importante cuando la zona presente contrastes topográficos. Aunque el efecto de desplazamiento del relieve es menor que en el caso de la fotografía aérea (debido a la altura de la órbita), también en las imágenes de satélite existe un efecto de desplazamiento que puede causar serios problemas en su ajuste cartográfico. Para intentar paliarlos, resulta recomendable introducir puntos de control sobre áreas de distinta altitud, e incluso sobre cotas, siempre que éstas resulten identificables en la imagen.

Nuestra propia experiencia indica que la selección de puntos de control es una tarea bastante laboriosa. En caso de un registro entre dos imágenes, el proceso se simplifica, puesto que es más sencillo identificar puntos comunes entre dos imágenes que entre imagen y mapa. En el primer caso, pueden utilizarse cruces de caminos y rasgos destacados de la vegetación, de difícil o imposible localización en un mapa.

En algunas ocasiones es preciso corregir distintas imágenes de la misma zona, por ejemplo obtenidas en varios años o en varias estaciones. Para evitar la búsqueda manual de puntos de control en cada una de ellas, algunos autores han sugerido un método de búsqueda automática (Ortí et al, 1979; Benny, 1981). Una vez localizados los puntos de control sobre una imagen utilizada como referencia, se delimitan sobre el resto unas ventanas de búsqueda, en torno a cada punto de control. Mediante un algoritmo iterativo, se desplaza el centro de esas ventanas, hasta que se encuentra la localización exacta de cada punto de control a partir de las correlaciones de ND entre la primera imagen y el resto. Este método reduce la tediosa tarea de localizar manualmente los puntos de control, aunque supone también un aumento notable del volumen de cálculo.

Tabla 6.3
Coordenadas de los puntos de control utilizados para corregir la imagen de Madrid

Punto	Columna	Fila	X-Mapa	Y-Mapa
1	153	251	433.750	4.488.150
2	151	369	433.050	4.484.775
3	264	345	436.500	4.484.800
4	398	209	441.200	4.488.000
10	515	650	442.050	4.474.350
6	855	418	453.450	4.479.120
7	553	623	443.350	4.474.925
8	643	808	444.900	4.468.925
9	775	748	449.150	4.469.925

La figura 6.17 recoge la localización de los puntos de control seleccionados para la imagen de Madrid. Se trata ésta de una zona especialmente idónea para esta labor, por cuanto existen múltiples rasgos humanos, claramente identificables sobre la imagen y el mapa. La tabla 6.3 presenta las coordenadas de esos puntos. La cartografía base corresponde a la serie del Mapa Topográfico a escala 1:50.000 del Servicio Geográfico del Ejército, realizada en proyección U.T.M.

6.5.3.2. Cálculo de las funciones de transformación

Como se comentó más arriba, la corrección digital de la geometría de una imagen se realiza estableciendo una función matemática, que pone en relación las coordenadas de la imagen con las del mapa. De esta forma, a partir de las coordenadas columna y línea de cada pixel, pueden estimarse las coordenadas x, y de la imagen de salida. Esquemáticamente esta transformación puede expresarse como (Mather, 1987):

$$\hat{s} = \sum_{j=0}^{m} \sum_{k=0}^{m-j} a_{jk}\, c^j\, l^k \qquad [6.15]$$

donde s indica la coordenada de la imagen corregida, que se estima a partir de las coordenadas de la imagen de entrada **c** y **l**. El superíndice m indica el grado del polinomio de ajuste. El caso más simple sería el de una ecuación lineal, en donde:

$$\hat{s}_i = a_0 + a_1\, c_i + a_2\, l_i \qquad [6.16]$$

o, si se prefiere, para las dos coordenadas del mapa:

$$\hat{X}_i = a_0 + a_1\, c_i + a_2\, l_i \qquad [6.17]$$

$$\hat{Y}_i = b_0 + b_1\, c_i + b_2\, l_i \qquad [6.18]$$

Como puede comprobarse, se trata de una regresión lineal múltiple, donde a_0, a_1, a_2, b_0, b_1 y b_2 son los coeficientes de regresión; c_i y l_i, las variables independientes, y X_i e Y_i indican las variables dependientes. En este caso, las variables independientes son las coordenadas columna y línea de la imagen, y las dependientes, o estimadas, las coordenadas x, y del mapa. De igual forma también podrían establecerse otras dos ecuaciones:

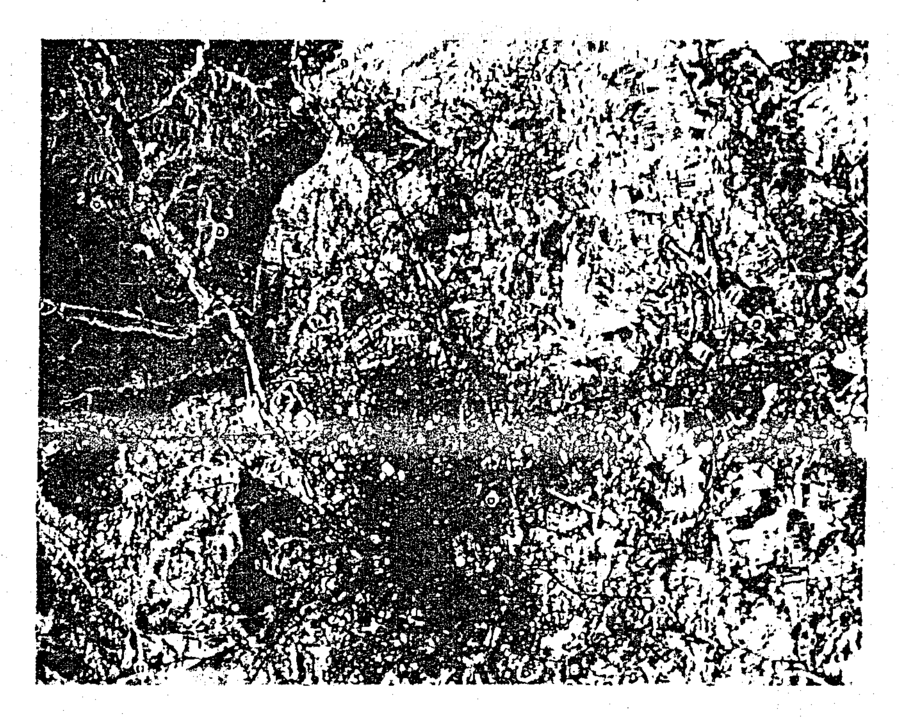


Fig. 6.17 - Puntos de control seleccionados para la corrección de la imagen de Madrid

$$\hat{c} = f_0 + f_1\, X + f_2\, Y \qquad [6.19]$$

$$\hat{l} = g_0 + g_1\, X + g_2\, Y \qquad [6.20]$$

Esto es, puede asimismo estimarse las coordenadas de columna (*c*) y línea (*l*) de la imagen corregida a partir de las coordenadas UTM del mapa de referencia. En definitiva, la conversión puede realizarse en un doble sentido: desde las coordenadas de la imagen al mapa y viceversa.

Al igual que en la regresión convencional, estas funciones pueden definirse gráficamente por un plano, que expresa la relación entre las coordenadas de las variables independientes (eje x e y), y la variable dependiente (eje z). Desde el punto de vista práctico, conviene considerar que una función lineal basta para aplicar unas transformaciones

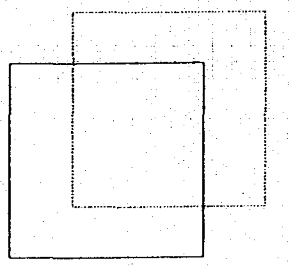
elementales de la imagen, como cambiar su escala y origen, inclinarla, modificar la relación entre sus ejes y rotarla (fig. 6.18). Estas alteraciones serán, de modo habitual, suficientes para corregir imágenes pequeñas, siempre que no se presenten contrastes altimétricos importantes. En caso de precisar una modificación más rigurosa, puede acudirse a funciones de segundo o tercer grado, en donde se abordan alteraciones geométricas no lineales. Por razones de mayor sencillez en la exposición, nos centraremos en las funciones de primer grado, si bien puede aplicarse el comentario al caso de polinomios más complejos.

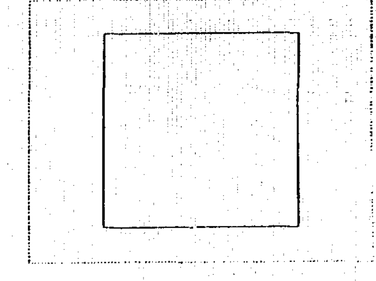
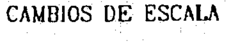
Los coeficientes de las funciones de transformación (a_0, a_1, a_2, etc.), se calculan a partir de las coordenadas de los puntos de control seleccionados previamente. El método más habitual para obtenerlos es aplicar un ajuste por mínimos cuadrados, con operaciones de cálculo idénticas a las que requiere una regresión múltiple convencional (Snedecor y Cochran, 1980; Jensen, 1986, pp. 102-115).

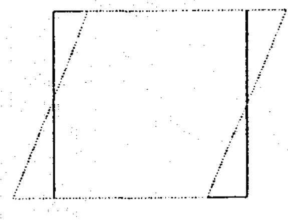
La bondad del grado de ajuste conseguido se mide por la importancia de los residuales. Como es bien sabido, el residual de la regresión es la diferencia entre el valor estimado y el real, para cada una de las observaciones empleadas en el proceso. Cuanto mayor sea ese valor, el ajuste entre las variables independiente y dependiente es menor. En nuestro caso, la calidad de la corrección geométrica puede valorarse comparando, para cada punto de control, las coordenadas estimadas por la regresión con las reales. El indicador más utilizado, con este objetivo, es el error medio cuadrático (RMS):

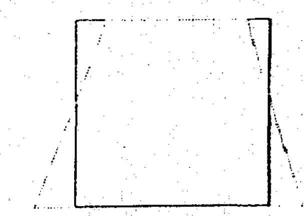
$$RMS_i = \sqrt{(\hat{c}_i - c_i)^2 + (\hat{l}_i - l_i)^2} \qquad [6.21]$$

para cada uno de los i puntos de control. Un alto RMS indica que ese punto no se ajusta convenientemente a la transformación imagen/mapa. El promedio de los RMS para todos los puntos de control facilita una evaluación de la calidad general del ajuste. Si ese valor no es satisfactorio, puede optarse por eliminar aquellos puntos con un alto RMS, ya que se asume que no se localizaron correctamente. Al eliminarse algún punto de control, se calcula de nuevo la ecuación de ajuste y los RMS para cada punto. El proceso se interrumpe cuando todos los puntos seleccionados presentan un RMS por debajo de un cierto umbral, previamente fijado. El error medio debe estar, en ese momento, dentro de unos márgenes tolerables, de acuerdo a la escala y a la precisión con que se pretenda obtener los resultados.







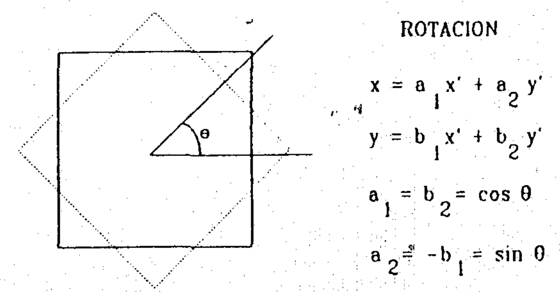


Fig. 6.18 - Ejemplos de transformación geométrica de la imagen

En nuestro caso, teniendo en cuenta la ausencia de relieves importantes en la imagen, se optó por elegir una ecuación de ajuste de primer grado, con un RMS máximo de 1 pixel (30 m). Sobre las coordenadas de los puntos de control seleccionados previamente, se obtuvieron las siguientes funciones de transformación:

$$\hat{c} = 14.769 + 0.0328\ X - 0.00642\ Y$$

$$\hat{l} = 149.675 - 0.00653\ X - 0.03266\ Y$$

A partir de estas ecuaciones, se calcularon las coordenadas estimadas de los puntos de control, para contabilizar el error medio cuadrático. Este se cifró en 1,49 pixels. Por cuanto el RMS era superior al marcado inicialmente en el trabajo, se procedió a suprimir el punto que ofrecía una mayor desviación en las estimaciones. Una vez eliminado, se calcularon de nuevo los coeficientes de regresión mapa-imagen, obteniéndose los siguientes resultados:

$$\hat{c} = 15.326{,}957 + 0{,}032688\ X - 0{,}00654\ Y$$

$$\hat{l} = 149.959{,}3 - 0{,}006566\ X - 0{,}032721\ Y$$

Estas ecuaciones ofrecieron un ajuste bastante adecuado, con un residual medio de 0,96 pixels (0,54 en X y 0,79 en Y). Esto supone un error estimado de 28,8 m, aceptable para nuestros propósitos. La tabla 6.4 recoge los residuales estimados, para cada uno de los puntos de control finalmente seleccionados en el ajuste.

6.5.3.3. Transferencia de los ND originales a la posición corregida

Las funciones antes analizadas permiten traducir coordenadas del mapa a la imagen. Ahora bien, si pretende crearse una imagen que se corresponda adecuadamente con esas coordenadas, resulta necesario trasvasar, de alguna forma, los ND de la imagen original a esa nueva posición. Las funciones de ajuste permiten calcular la posición correcta de cada pixel, pero no originan de suyo una nueva imagen, puesto que suponen sólo un trasvase de coordenadas y no de ND. Dicho de otro modo, con estas funciones de transformación puede crearse una nueva matriz, correctamente posicionada, pero vacía. El 'llenado' de esta matriz es, precisamente, el objetivo de la última fase de la corrección geométrica.

Tabla 6.4

Coordenadas de la imagen originales, estimadas por la regresión y residuales en filas y columnas

Nº	Colum. Imagen	Colum. Estimada	Residual Columna	Fila Imagen	Fila Estimada	Residual Fila
1	153	152,67	0,32894	251	252,83	-1,82653
2	151	151,86	-0,86213	369	367,86	1,14253
3	264	264,47	-0,47208	345	344,39	0,61394
4	398	397,18	0,82265	209	208,82	0,18343
10	515	514,23	0,76631	650	649,88	0,11807
6	855	855,48	-0,48421	418	417,96	0,03527
7	553	552,96	0,03249	623	622,53	0,46892
8	643	642,87	0,12591	808	808,68	-0,68167
9	775	775,26	-0,25787	748	748,05	-0,05396

El problema resulta más complejo de lo que pudiera pensarse a primera vista. Idealmente, cada pixel de la imagen corregida debería corresponderse a un sólo pixel en la original. Lo normal es que no sea así, sino que el pixel de la nueva imagen se sitúe entre varios de la original (fig. 6.19), ya que este proceso supone una alteración considerable de la geometría original de la escena. Por otra parte, puede variarse también el tamaño del pixel en la imagen corregida, haciendo aún más complejo encontrar el ND que mejor exprese el valor radiométrico originalmente detectado por el sensor.

El trasvase de ND a la imagen corregida se ha abordado por tres métodos: (i) vecino más próximo, (ii) interpolación bilineal, y (iii) convolución cúbica. En realidad, pueden resumirse en dos, según almacenen un ND de la imagen original, o lo obtengan gracias a una interpolación de varios ND originales (fig. 6.19).

El primer método se denomina del vecino más próximo (*nearest neighbour*), por situar en cada celdilla de la imagen corregida el ND del pixel más cercano en la imagen original. Esta es la solución más rápida y la que supone menor transformación de los ND originales. Su principal inconveniente radica en la distorsión que introduce en rasgos lineales de la imagen (fracturas, carreteras o caminos), que pueden aparecer en la corregida como líneas quebradas (fig. 6.20).



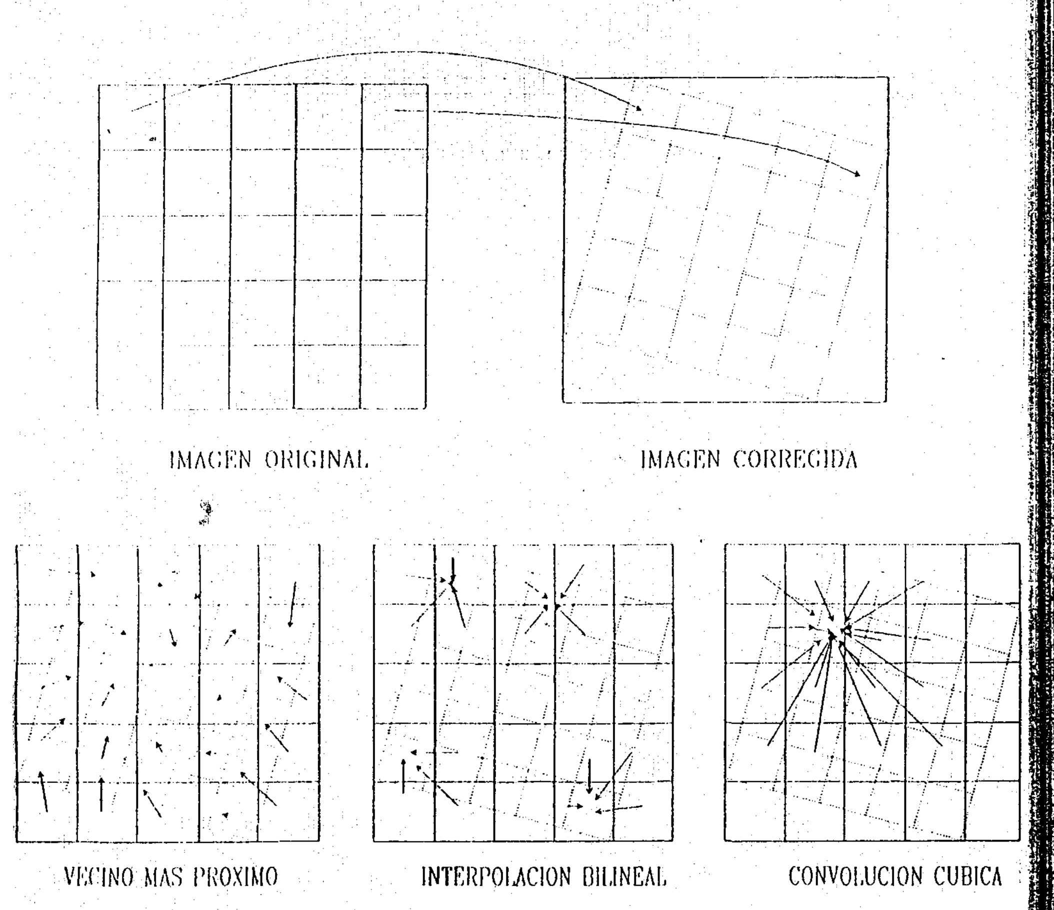


Fig. 6.19 - Efecto del algoritmo de transferencia en la corrección geométrica de la imagen

La interpolación bilineal (*bilinear interpolation*), supone promediar el ND de los cuatro pixels más cercanos en la original. Este promedio se pondera según la distancia del pixel original al corregido: tienen una mayor influencia aquellos pixels más cercanos en la imagen inicial. Reduce el efecto de distorsión en rasgos lineales, pero tiende a difuminar un tanto los contrastes espaciales de la imagen original.

Por último, la convolución cúbica (*cubic convolution*) considera los ND de los 16 pixels más próximos. El efecto visual es más correcto, pero supone un volumen de cálculo mucho más elevado.

La elección entre uno de los tres métodos depende de la finalidad del proceso y de los recursos informáticos disponibles. Si pretende corregirse una imagen clasificada, el método del vecino más próximo es la elección obligada, pues es el único que preserva los valores originales al no introducir promedios (que, por otra parte, no tendrían sentido en una clasificación temática). Si, por el contrario, se pretende facilitar el análisis visual, habrá de optarse por algoritmos de interpolación más sofisticados, concretamente por el de convolución cúbica si se cuenta con los recursos informáticos apropiados.

Un ejemplo del efecto causado por estos tres métodos de trasvasar los ND a la imagen corregida puede analizarse en la figura 6.20, correspondiente a la corrección de una sub-imagen de la zona de Madrid, con que venimos trabajando. Queda bien patente el efecto de los algoritmos de interpolación, especialmente en el suavizado que introducen de las áreas fronterizas: calles o estanque del retiro, por ejemplo, más distorsionadas en el método del vecino más próximo.

Con objeto de aclarar un poco más el proceso de interpolación, vamos a comentar con cierto detalle el que podría seguirse en el caso del método del vecino más próximo, el más habitual en los trabajos de corrección, ya que es el único aplicable a imágenes clasificadas (6.9.1). Este método parte de las funciones de transformación antes aludidas. Las coordenadas de cada pixel en la imagen corregida se calculan a partir de las coordenadas del mapa, mientras su ND se estima asumiendo el ND del pixel más próximo en la original.

En pocas palabras, el proceso requiere dos parámetros: coordenadas X,Y de los vértices que definen la zona a corregir, y tamaño del pixel en metros. En nuestro caso, se señalaron los vértices NW (430.000,4.495.000) y SE (455.000,4.465.000) de la imagen de Madrid, en coordenadas UTM, asignando un tamaño de 50 m al pixel de salida.

Con estos datos, el programa opera de la forma siguiente:

(i) Estima las coordenadas, en columnas y líneas, de los vértices de la imagen corregida, a partir de las ecuaciones de ajuste previamente calculadas [6.19 y 6.20]. Suele comenzarse por el vértice NW, puesto que resulta el origen de la nueva imagen:

$$\hat{c} = 15.326{,}957 + 0{,}032688 \; 430.000 - 0{,}00654 \; 4.495.000 = -14{,}58$$

$$\hat{l} = 149.959{,}3 - 0{,}006566 \; 430.000 - 0{,}03272 \; 4.495.000 = 54{,}94$$

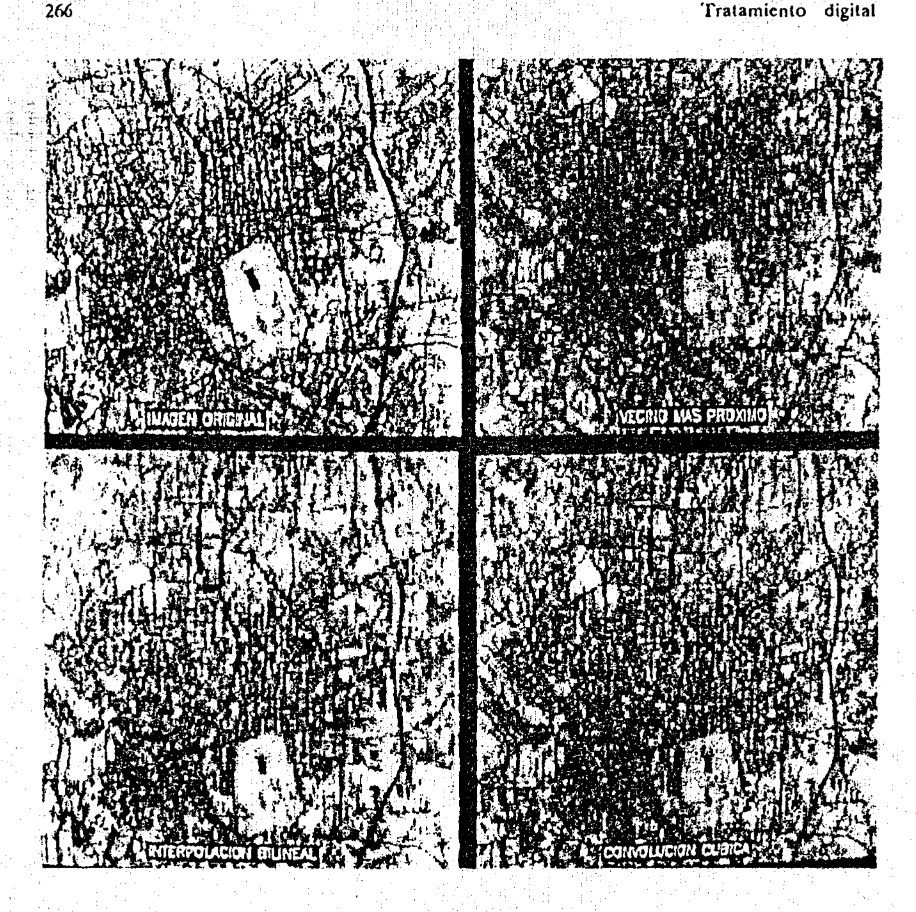


Fig. 6.20 - Corrección digital con distintos algoritmos de interpolación

(ii). Una vez calculadas sus coordenadas, se requiere conocer el ND que corresponde a ese vértice. De acuerdo al método del vecino más próximo, basta conocer el ND correspondiente al pixel más cercano a ese vértice en la imagen original. Por cuanto la corrección de la imagen supone una rotación de la original, puede ocurrir que las esquinas de la nueva imagen aparezcan en negro; esto es, que sus ND sean cero. Esto sucede cuando alguna de las dos coordenadas estimadas (c ó l) no se encuentra en el rango definido por el tamaño de la imagen original (de 1 a 900 en columnas, y de 1 a 1.000 en líneas, en nuestro ejemplo). Si éste es el caso, el ND de salida se iguala a 0, ya que no puede estimarse a partir de la original. Precisamente esto ocurre con el vértice NW, que

ofrece un valor de columna negativo (-14,58). Si, por el contrario, ambas coordenadas se encuentran en el rango de la imagen de entrada, el ND de salida corresponde al ND del pixel inicial más cercano; esto es, el que se sitúa en las coordenadas correspondientes al entero más próximo a la columna y línea estimada. Por ejemplo, en el caso del vértice SE, con coordenadas de entrada 455.000 y 4.465.000, la columna estimada es 998,88, mientras la fila estimada es 876,97. En consecuencia, el ND de ese vértice sería el situado en las coordenadas 999 y 877 de la imagen original.

(iii). El resto de los ND de la imagen se calculan de forma similar. Conociendo las coordenadas UTM del vértice NW de la zona y el tamaño del pixel, puede calcularse las coordenadas UTM de cada uno de los pixels en la imagen resultante. Por ejemplo, el pixel situado en la columna 220 y línea 165 de la imagen de salida, tendrá las siguientes coordenadas UTM:

$$X(220,165) = 430.000 + 220 \times 50 = 441.000$$

$$Y(220,165) = 4.495.000 - 165 \times 50 = 4.486.750$$

Como el origen de la imagen está situado en la esquina superior izquierda, la coordenada UTM de esa columna se calcula a partir de la correspondiente al vértice NW (430.000,4.495.000), sumándole el número de columnas (220), por el tamaño en metros de cada pixel (50 m). Esto ofrece la coordenada X en metros, correspondiente a dicha localización. Por su parte, la coordenada Y, precisa que restemos su distancia en metros de la esquina de la imagen, ya que su origen -no hemos de olvidarlo- está en la vértice superior izquierdo, mientras el del mapa está en el inferior izquierdo. En resumen, se pretende conocer el ND correspondiente al pixel (220,165) de la imagen corregida, que cuenta con unas coordenadas UTM (441.000,4.486.750). Esas coordenadas nos sirven para estimar cuál es el pixel más próximo en la imagen original. Basta, para ello, acudir a las fórmulas anteriores:

$$\hat{c} = 15.326,957 + 0,032688\ 441.000 - 0,00654\ 4.486.750 = 398,94$$

$$\hat{l} = 149.959,3 - 0,006566\ 441.000 - 0,03272\ 4.486.750 = 252,66$$

A partir de ellas, el ND del pixel (220,165) en la imagen corregida tendrá asignado el ND del pixel situado en la columna 399, línea 253 de

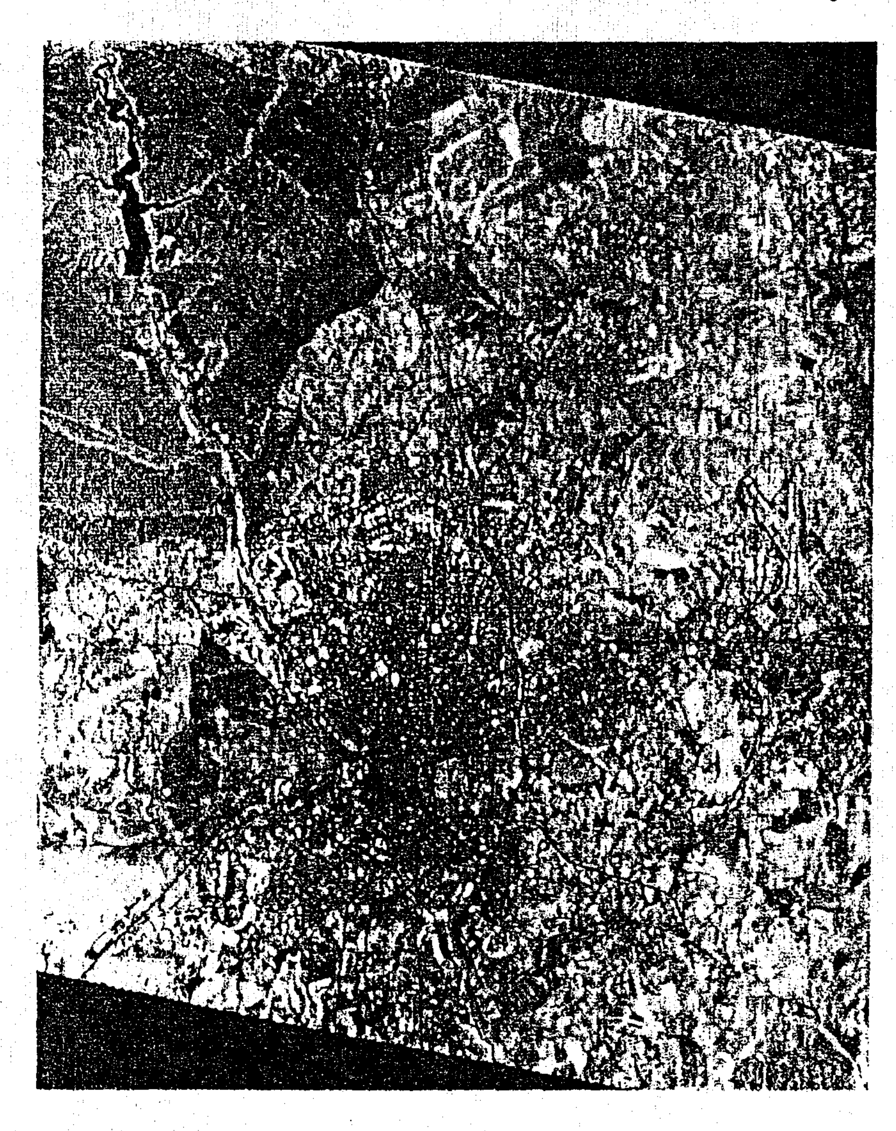


Fig. 6.21 - Imagen corregida (banda 4)

la imagen original. Este proceso se continúa hasta que se alcanza el vértice SW de la zona designada por el usuario, momento en el cual se culmina el proceso de corrección.

El resultado del proceso aparece en la figura 6.21. Se trata de la corrección de la imagen de Madrid, concretamente de la banda 4, tras aplicar el método del vecino más próximo, y de haber reducido el tamaño del pixel a 50 m. Resulta patente la distorsión aplicada a la imagen original, especialmente en lo que se refiere a su orientación y tamaño.

6.5.3.4. Conveniencia de las correcciones geométricas

Antes de terminar el presente epígrafe, conviene hacer una breve reflexión sobre la necesidad y momento de las correcciones geométricas. Tradicionalmente esta operación se ha concebido como previa e imprescindible a cualquier análisis posterior de la imagen. En los últimos años, sin embargo, se prefiere restringir estas correcciones a la fase final del trabajo, una vez que se haya obtenido un mapa de clasificación (6.9.1.1).

La razón es doble: por un lado, se reduce el tiempo de tratamiento, pues, en lugar de corregir todas las bandas originales, basta corregir una, la que contiene la imagen clasificada; por otro, se aborda la clasificación con los valores originales, evitando el efecto de promedio parejo a la tercera fase del proceso de corrección. Algunos autores han estudiado la importancia de este efecto (Kovalik, 1983; Smith y Kovalik, 1985). Las conclusiones de estos trabajos aconsejan realizar la clasificación con los valores originales, si bien no se encontraron grandes pérdidas de exactitud con el empleo de las imágenes corregidas.

Pese a los comentarios previos, conviene tener presente que, en determinadas aplicaciones, las correcciones resultan un paso obligado y previo a otros tratamientos. Este es el caso de las aplicaciones cartográficas en general -y, específicamente, en lo que se refiere a la realización de mosaicos (Hord, 1982; Verhoef y Peteri, 1984)-, así como los estudios multi-temporales (6.8.3.4.4) o los que acudan a información auxiliar (6.8.3.4.3). En ambos casos, la precisión en el ajuste resulta un elemento fundamental, por cuanto este tipo de procesos suele abordarse por comparación, pixel a pixel, entre dos o más imágenes (o entre imagen y mapa). Una significativa imprecisión en esta fase puede invalidar las conclusiones posteriores del trabajo (Gordon, 1980).

En resumen, puede afirmarse que las correcciones geométricas son necesarias en la mayor parte de las aplicaciones de la teledetección espacial, aunque no en todas ellas como fase previa de trabajo. Si lo que se pretende es conectar los resultados de la clasificación con otras varia-

bles geográficas (cap. 8), o superponer dos clasificaciones realizadas en distinta fecha, las correcciones geométricas pueden abordarse al finalizar el proceso de análisis. Ahora bien, si pretenden introducirse variables o imágenes auxiliares en la clasificación, es evidente que el registro geométrico es necesario previamente a otros tratamientos.

6.6. REALCES Y MEJORAS DE LA IMAGEN

En este capítulo se consideran aquellas técnicas dirigidas hacia la mejora de la calidad visual de la imagen. En otras palabras, se trata de disponer mejor los datos para su análisis visual, de tal forma que sean más evidentes los rasgos de interés que presenta la imagen. Se incluyen en este capítulo los procesos de mejora del contraste, composiciones coloreadas, cambios de escala, y filtrajes.

6.6.1. Ajuste del contraste

6.6.1.1. Necesidad del ajuste

Los procesos de ajuste del contraste tienden a adaptar la resolución radiométrica de la imagen a la capacidad del monitor de visualización. Como ya vimos anteriormente (3.2.3), cada sensor codifica la radiancia recibida en un número determinado de ND, de acuerdo a las características de su diseño. Ese rango digital puede no corresponder con el número de niveles de visualización (NV) que facilita la consola gráfica, por lo que resulta preciso ajustar, por algún procedimiento, ambos parámetros. En este sentido, caben dos posibles situaciones: (i) que el sensor ofrezca un menor número de ND que el de NV facilitado por el sistema de tratamiento, y (ii) que el sensor presente un número de ND que exceda la capacidad del sistema. En el primer caso, se deberá aplicar una expansión del contraste original, mientras en el segundo una reducción del mismo.

La idea de contraste digital puede ilustrarse con un símil fotográfico. Una fotografía aparece con poco contraste, desvaída, cuando no existe una gran diferencia entre sus tonos más claros y más oscuros. De la misma forma, podemos definir digitalmente el contraste por relación a los ND máximo y mínimo de una imagen. Tal definición puede apoyarse en cualquiera de las medidas de dispersión comúnmente utilizadas en estadística (Schowengerdt, 1983):

$$C_1 = ND_{max} / ND_{min} \quad [6.22]$$

$$C_2 = ND_{max} - ND_{min} \quad [6.23]$$

$$C_3 = \sigma_{ND} \quad [6.24]$$

Aquí aparecen tres definiciones digitales del contraste: el cociente entre el valor máximo y el mínimo, el rango, y la desviación típica de los ND de la imagen. A partir de estas medidas, puede juzgarse la necesidad de la expandir o comprimir el contraste, en función de las capacidades de visualización ofrecidas por el sistema. Hasta el momento, el primer proceso ha sido empleado rutinariamente en la mayor parte de las aplicaciones. En cuanto a la compresión del contraste, se presenta como una materia relativamente novedosa, pero que está alcanzando un creciente interés ante la generalización de equipos de bajo coste y la necesidad de reducir el almacenamiento de las imágenes. A continuación se analizan con mayor detalle ambos procesos. Se inicia ese comentario con el análisis de la técnica que permite aplicarlos operativamente: el diseño y empleo de las tablas de color.

6.6.1.2. Tablas de referencia del color

Una tabla de referencia del color (*Color Look Up Table*, CLUT), es una matriz numérica que indica el nivel visual (NV) con el que se representa en pantalla cada uno de los ND de la imagen. La CLUT se inserta entre la memoria de refresco y el tubo de imagen del monitor (6.3.1.3), lo que permite modificar la relación entre el ND almacenado en disco y la intensidad de brillo con que se visualiza. En otras palabras, cada ND puede hacerse corresponder con un nivel visual (NV), que no tiene por qué ser igual a él.

En la mayor parte de los equipos de tratamiento, la CLUT es una matriz numérica de 3 columnas por 256 filas. El orden de las filas indica el ND de entrada, mientras el número almacenado en la tabla expresa el nivel visual (NV), con el que ese ND será representado en pantalla. Las tres columnas corresponden a los tres colores elementales (azul, verde y rojo). Por tanto, una CLUT está formada por tantas filas como ND tenga la imagen y por tres columnas correspondientes al NV de rojo, verde y azul, que se aplicará a cada ND (fig. 6.22a).

Conviene recordar que los equipos de tratamiento digital de imágenes utilizan el proceso aditivo de formación del color (5.2.2), por lo que cuanto mayor sean los valores de NV en cada columna, mayor componente de rojo, verde o azul tendrá el pixel finalmente visualizado. Caso

CLUT

ND	NV Rojo	NV Verde	NV Azul
1	1	1	1
2	2	2	2
3	3	3	3
...			
255	255	255	255

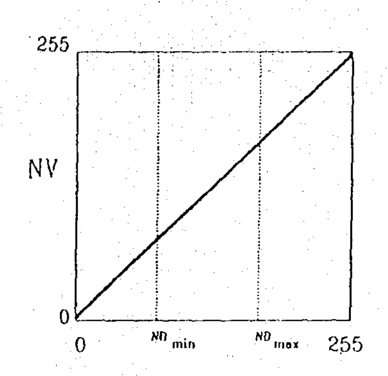


Fig. 6.22 - Estructura y representación gráfica de una CLUT.

de que se esté manipulando una sóla banda, lo normal es que la imagen aparezca en pantalla en tonos de gris. Esto significa que cada ND tiene el mismo componente de rojo, verde y azul. Un NV de 0,0,0, indica que el ND al que se aplique será visualizado como negro, mientras que 127,127,127, supone un gris medio y 255,255,255, blanco. Caso de que los tres valores sean distintos, se estará representando una imagen en color, ya sea con una o con tres bandas.

Por cuanto una CLUT implica una relación numérica entre ND y NV, ésta puede también representarse gráficamente en un diagrama bivariado, en donde el eje X indica el ND de la imagen, y el eje Y el NV almacenado en la consola. Si se visualiza la imagen original, sin ningún realce, la CLUT puede describirse gráficamente como una línea recta, que pasa por el origen 0,0 y por el máximo 255,255 (fig. 6.22b). Esto supone, en definitiva, que el NV corresponde al ND. Con los procesos de expansión o compresión del contraste se modifica esa relación, de tal forma que los NV se distribuyan adecuadamente en el rango permitido por el sistema de tratamiento.

La utilidad de estas tablas numéricas puede comprenderse fácilmente con un ejemplo. Supongamos que se pretende expandir el contraste en una imagen que presente un rango de ND entre 0 y 127. Para ajustar dicho rango al que permite el equipo de visualización (0 a 255), bastaría multiplicar por dos cada ND de entrada, lo que ampliaría su contraste a un rango entre 0 y 254. Ahora bien, tal opción conlleva dos problemas importantes. Por un lado, implica transformar los ND iniciales para crear una nueva imagen de salida, lo que supone, o bien perder la información original, o bien aumentar las necesidades de almacenamiento. Por otro

lado, ese proceso supone un volumen de operaciones considerable: 786.432 multiplicaciones para una pequeña zona de 512 x 512 pixels y tres bandas. Si consideramos que el realce es sólo una etapa intermedia, y normalmente efímera, del proceso, parece lógico buscar una alternativa a ese método.

Gracias a la CLUT no es preciso transformar los ND para modificar el contraste visual de la imagen. Basta únicamente transformar la relación entre ND y NV que incluye la CLUT, de acuerdo al criterio que se estime más oportuno. En el caso anterior, podría multiplicarse cada NV por dos, con lo que se obtendría el mismo efecto visual que la multiplicación de todos los ND, con un considerable ahorro de tiempo. La modificación de una CLUT sólo supone 768 cálculos (256 NV x 3 cañones de color), independientemente del tamaño de la imagen, frente a las miles de operaciones que requiere la transformación de los ND originales.

A continuación se presentan las técnicas más habituales en realce digital de imágenes. En pocas palabras, son diversos procedimientos de obtener una CLUT apropiada a un fin específico: compresión o expansión del contraste, combinaciones en color multi-banda, visualización pseudo-coloreada y construcción de tablas de color de significado temático.

6.6.1.3. Compresión del contraste

En caso de que el rango del sensor supere al número de niveles de gris que pueden visualizarse en pantalla, resulta preciso comprimir los ND originales, ajustando el rango de la imagen al permitido por el terminal gráfico. Estos ajustes son necesarios en dos casos: (i) cuando se cuenta con un monitor de reducida potencia, o (ii) cuando se trabaja con un sensor de gran sensibilidad radiométrica.

Como ya se vio en 6.3.3, la mayor parte de los equipos de tratamiento digital cuentan con una resolución en pantalla de 8 bits para cada uno de los tres cañones de color (rojo, verde y azul). Esto permite visualizar una banda en 256 niveles de gris, o tres bandas en unos 16 millones de tonos (256^3). Lógicamente, los equipos más modestos, basados sobre tarjetas de bajo coste, tipo EGA o VGA, disponen de un número mucho menor de colores (entre 16 y 256 por pixel), lo que les impide visualizar todo el rango de ND recogido originalmente por el sensor. Por esta razón, cuando se trabaja con estos equipos resulta necesario comprimir el

contraste original de la imagen al número de NV disponibles. Asimismo, la compresión es precisa cuando se pretende visualizar una imagen AVHRR, codificada en 10 bits, o un modelo digital del relieve (16 bits), sobre un monitor gráfico que sólo admite 8 bits.

El problema puede solventarse de dos formas: eliminando una parte de la escala que no se considere relevante, o estableciendo una función de compresión de datos. La primera solución es bastante obvia, aunque poco habitual ya que supone una eliminación arbitraria de datos. La segunda puede abordarse por distintos criterios.

En equipos de bajo coste, lo más habitual es establecer un número de intervalos en los ND de la imagen original, de acuerdo a la forma de su histograma. De esta forma, puede dividirse el rango, o bien entre intervalos de igual anchura, o que contengan el mismo número de elementos, o bien entre intervalos delimitados por el intérprete. En cualquier caso, a cada uno de ellos se le asigna un sólo NV, eliminando su variación interna. Al reducirse el contraste de la escena, la imagen aparece menos nítida, reduciéndose la calidad de la visualización. Algunos de estos sistemas de bajo coste emplean una técnica denominada *dithering*, gracias a la cual simulan un mayor número de colores en pantalla a partir de emplear una matriz de 2 x 2 elementos, que sirve para representar cada uno de los pixels de la imagen (Loomer, 1987).

Recientemente se están poniendo a punto otros algoritmos de compresión de imagen algo más refinados (Muller, 1988; Baudot, 1990). Esta línea de investigación se justifica por la creciente disponibilidad de imágenes, de muy variados sensores, que complica cada vez más el proceso de almacenamiento y análisis de la información. Asimismo, estas técnicas permiten emplear equipos de menor coste para la visualización y tratamiento numérico, sin pérdidas excesivas de información. Por otro lado, hemos de considerar que el ojo humano no es capaz de distinguir todas las variaciones cromáticas de un monitor sofisticado, por lo que, hasta cierto punto, parte de la información representada resulta superflua para el análisis visual.

El algoritmo de compresión incluido en el equipo ERDAS permite transformar una imagen de 24 a 8 bits, reduciendo drásticamente sus necesidades de almacenamiento. El proceso parte de considerar las características de la composición en color que se va a comprimir. En nuestro caso, se pretendía aplicar esta técnica a una combinación en falso color de la imagen de Madrid, formada por las bandas TM 4, 3 y 2 (fig. 6.23*).

Para diseñar una CLUT que representara, lo más fielmente posible, los colores originales, se establecieron una serie de particiones en el espacio tri-dimensional formado por los tres colores que forman la composición (fig. 6.32). En nuestro caso, se asignaron 31 particiones al color rojo, 32 al verde y 26 al azul. El máximo permitido es 32 por color. La diferencia entre colores se debe a que la banda 3, asignada al verde, contaba con una dispersión mayor, por lo que parecía oportuno concederle una mayor amplitud en la representación final. Para asignar un intervalo de ND a cada una de esas particiones, se establece el rango de variación más significativo en cada una de las bandas, calculado a partir de su media y desviación típica. En función del número de particiones por color y del rango de ND asignado al mismo, el programa clasificó cada ND original en la partición más adecuada, de tal forma que se cumpliera un umbral mínimo por partición. En este caso, ese umbral se fijó en el 0,081 % de los pixels originales.

El resultado del proceso es una nueva imagen, mono-banda, que se asocia a una CLUT para representar, con la mayor semejanza posible, la variación cromática de la composición multi-banda. La figura 6.24* recoge el resultado final del proceso. Si se compara ésta con la figura anterior, resulta difícil notar las diferencias tonales frente a la composición original. Conviene notar, sin embargo, que la imagen comprimida precisa sólo un tercio del espacio de almacenamiento que requiere la multibanda. En consecuencia, para el análisis visual puede ser una estrategia de interés, así como para el mantenimiento de archivos de imágenes. Este tipo de productos no son válidos para la clasificación digital, ya que se pierden los ND de partida, si bien recientes estudios sugieren abordar una clasificación temática a partir de la imagen comprimida, conjugando criterios visuales y digitales (Baudot, 1990).

6.6.1.4. Expansión del contraste

Aunque es conveniente tener en cuenta la necesidad de esta compresión, son mucho más habituales los procesos de realce del contraste, porque la mayor parte de las imágenes ofrecen un rango de ND inferior a las capacidades del equipo de visualización.

Como ya tuvimos ocasión de comentar, la mayor parte de los sensores actuales codifican la señal recibida en un rango de 256 niveles, que es el habitual en un equipo de tratamiento de imágenes. Podría pensarse, entonces, que no es necesario el ajuste entre valor numérico y valor visual, por cuanto coinciden la sensibilidad radiométrica del sensor con

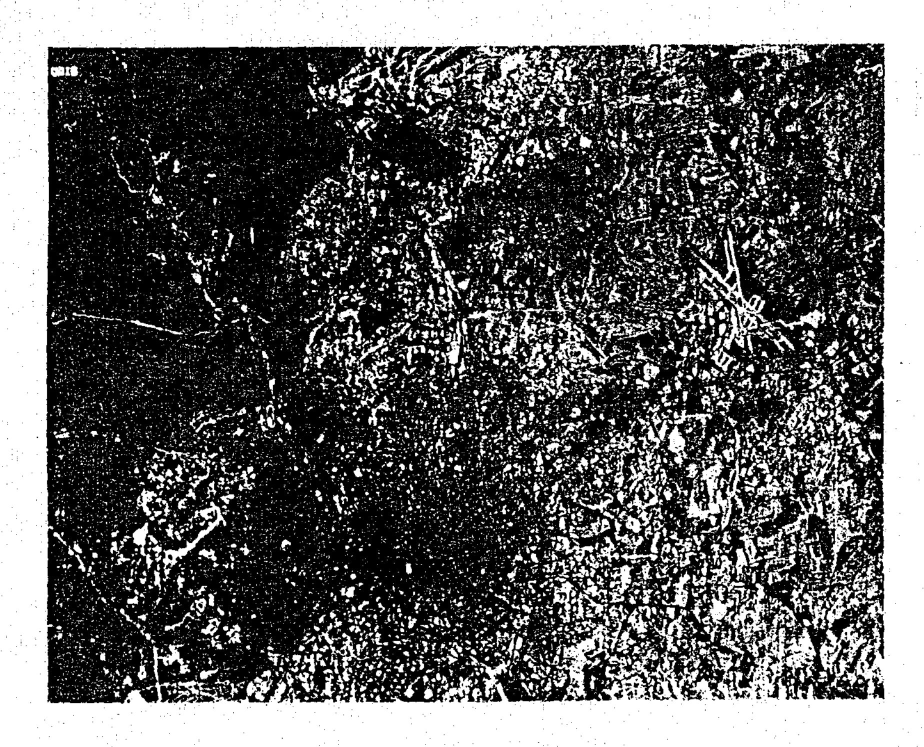


Fig. 6.25 - Imagen original (banda 2)

la del equipo de visualización. Ahora bien, ese rango máximo de ND debe aplicarse al conjunto de paisajes que puede detectar el sensor, desde los de muy baja reflectividad de las zonas marinas, a los de alta reflectividad del desierto o las áreas nevadas. Lógicamente, en una sóla escena casi nunca se alberga tal variedad de paisajes, por lo que el rango final de la imagen no coincide con el número de ND disponibles. Esto supone que la imagen aparezca un tanto desvaída, poco contrastada, ya que una buena parte de los 256 niveles de gris permitido por el monitor quedan inactivos.

Por ejemplo, la figura 6.25 presenta la banda 2 de la imagen de Madrid, tal y como corresponde a sus ND originales. Como puede observarse, la imagen ofrece un bajo contraste, difuminándose algunas características de interés. Esta banda presenta un rango de 140 ND, con una desviación típica de 12,93. Su histograma, ya recogido en la figura 6.10, ocupa sólo un pequeño sector de los 256 ND posibles, lo que confirma su reducido contraste.

De acuerdo a las ideas antes comentadas, es posible realzar ese contraste, diseñando una CLUT que haga corresponder el rango de ND presente en la imagen con el total de los NV posibles. Varios procedimientos pueden conseguir este objetivo: (i) distribuir los NV linealmente, entre el máximo y mínimo ND de la imagen, (ii) distribuir los NV a partir del histograma de los ND, y (iii) distribuir los NV en un determinado rango de interés. Estos son los tres procesos de expansión del contraste que a continuación se analizan. Para todos ellos, podemos considerar una CLUT de una sóla columna, ya que la expansión se aplica a cada banda independientemente del resto.

6.6.1.4.1. Expansión lineal

Es la forma más elemental de ajustar el contraste de la imagen al permitido por el equipo de visualización. Basta diseñar una CLUT en la que el ND mínimo y máximo de la imagen tengan asociados un NV de 0 y 255, respectivamente, distribuyendo linealmente el resto entre ambos márgenes. En la figura 6.26 aparece la imagen anteriormente presentada tras aplicarle una expansión lineal del contraste. Como puede observarse, la imagen aparece ahora más nítida, mejor contrastada. Su histograma ofrece una distribución más equilibrada (fig. 6.27a). Las colas del histograma se han fijado en los extremos del rango y los valores intermedios están mejor repartidos en la escala. La representación gráfica de la CLUT supone una línea de mayor pendiente que la anterior, comprendida ahora entre los ND mínimo y máximo (fig. 6.27b).

Para llevar a efecto esta transformación se precisa encontrar una función lineal, que ajuste la relación ND-NV de acuerdo a la relación antes comentada. Esa función nos permite construir una CLUT apropiada, en la que se sustituya la correspondencia ND = NV, por una nueva, en donde los NV ocupen el rango completo de visualización y no sólo el que ofrece la imagen original. En definitiva, se trata de establecer una ecuación lineal del tipo siguiente:

$$NV = s + g\, ND \qquad [6.25]$$

en donde cada NV es una función de los ND originales, tras aplicarles dos constantes, denominadas sesgo (*bias*) y ganancia (*gain*), respectivamente. Para conocer el valor de **s** y **g**, basta aplicar un sencillo sistema de ecuaciones. Por cuanto sabemos que el origen y el fin de los NV deben igualarse a 0 y 255, respectivamente, puede expresarse:



Fig. 6.26 - Imagen realzada con expansión lineal del contraste

$$0 = s + g\ ND_{min}$$

y

$$255 = s + g\ ND_{max}$$

Sustituyendo en ambas fórmulas, los coeficientes se calculan como:

$$g = \frac{255}{ND_{max} - ND_{min}} \qquad [6.26]$$

y

$$s = \frac{-255 \times ND_{min}}{ND_{max} - ND_{min}} \qquad [6.27]$$

La transformación puede expresarse en una sólo término como:

$$NV = \frac{ND - ND_{min}}{ND_{max} - ND_{min}} \times 255 \qquad [6.28]$$

pero resulta más apropiado utilizar [6.25], por ser la fórmula convencional en transformaciones lineales de datos. En lugar de ND_{max} y ND_{min}, pueden aplicarse otras medidas del rango, como los percentiles del 95 y 5 %, o un cierto número de desviaciones típicas respecto a la media.

Un ejemplo concreto puede ayudar a comprender mejor el proceso. Para obtener la expansión lineal del contraste antes presentada, bastó conocer las medidas estadísticas de esa banda (tabla 6.1) para aplicar las fórmulas anteriores. En este caso, se estableció un umbral mínimo y máximo a partir de la media más-menos dos desviaciones típicas. En consecuencia el rango a expandir se sitúa entre 27 y 79. De acuerdo a [6.26 y 6.27]:

$$g = \frac{255}{79 - 27} = 4{,}904$$

y

$$s = \frac{-255 \times 27}{79 - 27} = -132{,}404$$

Con estos valores puede construirse la CLUT que aparece en la tabla 6.5, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$NV = -132{,}404 + 4{,}904\ ND$$

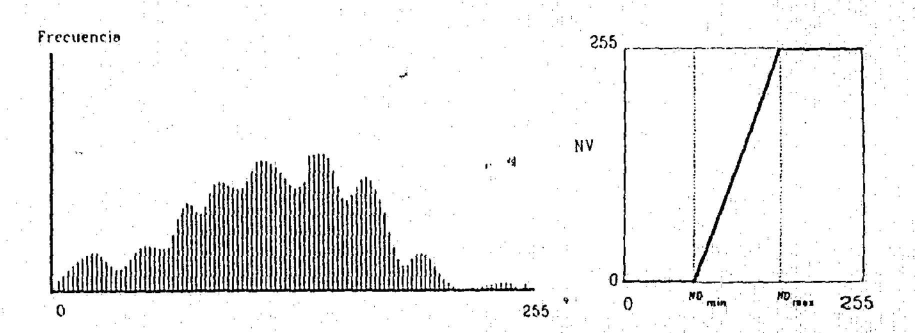


Fig. 6.27 - Histograma y CLUT para la imagen realzada linealmente

Tabla 6.5
CLUT aplicada sobre la imagen de Madrid
(Expansión lineal del contraste)

ND	NV	ND	NV	ND	NV	ND	NV	ND	NV
0	0	34	34	46	93	58	152	70	210
5	0	35	39	47	98	59	156	71	215
10	0	36	44	48	102	60	161	72	220
15	0	37	49	49	107	61	166	73	225
20	0	38	53	50	112	62	171	75	235
27	0	39	58	51	117	63	176	76	240
28	4	40	63	52	122	64	181	77	245
29	9	41	68	53	127	65	186	78	250
30	14	42	73	54	132	66	191	79	255
31	19	43	78	55	137	67	196	80	255
32	24	44	83	56	142	68	201	85	255
33	29	45	88	57	147	69	205...		

Esta tabla puede representarse gráficamente, de forma similar a cualquier recta de regresión (fig. 6.27b).

6.6.1.4.2. Ecualización del histograma

La expansión lineal del contraste no tiene en cuenta las características del histograma de la imagen, sino sólo sus extremos. Puede idearse una técnica de realce más depurada, en donde se considere la forma de la distribución de frecuencias en los ND originales. Según este criterio, el NV de cada ND está en proporción no sólo a su valor, sino también a su frecuencia. Aquellos ND con mayor número de pixels serán los que, proporcionalmente, ocupen un mayor rango de visualización en el monitor. El proceso es más lento que el comentado previamente, pero ofrece mejores resultados, especialmente si la imagen original presenta una distribución gausiana.

Como puede observarse en la figura 6.28, la ecualización del histograma ha supuesto un realce un tanto más detallado, especialmente para las zonas urbanas que ocupan una buena parte del rango de ND original. A consecuencia de este realce, el histograma de la imagen ofrece una mejor distribución de los datos (fig. 6.29a). El perfil gráfico de la CLUT se asemeja bastante al que tendría el histograma acumulado de los ND originales (fig. 6.29b).

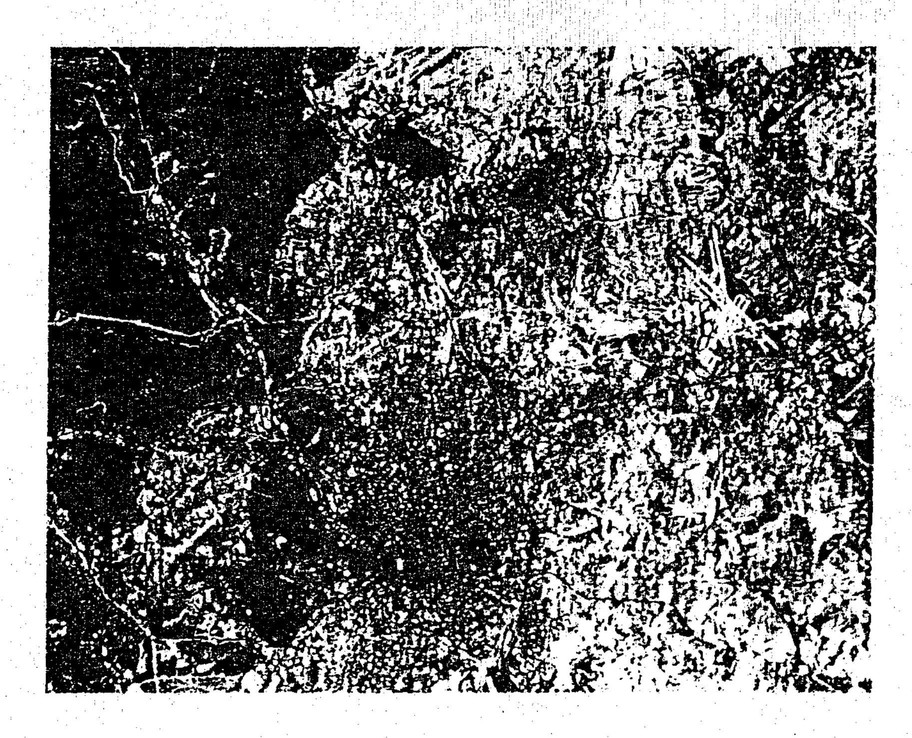


Fig. 6.28 - Imagen realzada mediante ecualización del histograma

La lógica de cálculo pasa por igualar el histograma de los NV con el de los ND. Para construir una CLUT con un trazado similar al histograma de la imagen, puede seguirse el siguiente proceso (tabla 6.6):

(i) Calcular la frecuencia absoluta y acumulada de los ND de la imagen original.

(ii) Esta frecuencia se compara con una frecuencia objeto, que sería la que se obtendría si todos los ND de la imagen tuvieran la misma frecuencia (el cociente entre el número de pixels y el número de ND posibles). En nuestro caso, la frecuencia objeto sería 900.000/256; esto es, 3.514,26 pixels por cada ND. Trabajando con frecuencias relativas, cada ND debería presentar el 0,3906 % de los pixels de la imagen. Estos valores también se acumulan para compararlos con la frecuencia acumulada de la imagen.

(iii) De esta comparación se deduce el NV para cada ND, teniendo en cuenta que, para cada ND original, el NV será aquel que presente un valor más próximo en la frecuencia objeto acumulada. Como puede observarse en la tabla 6.6, el NV correspondiente a todos los ND inferio-

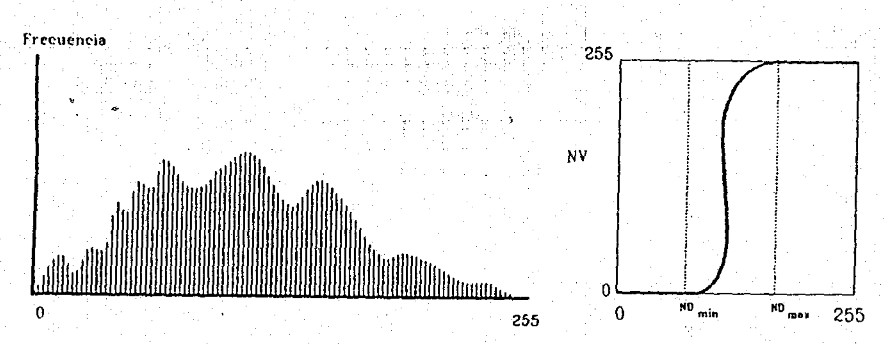


Fig. 6.29 - Histograma y CLUT para la imagen realzada frecuencialmente

res a 29 es 0, porque la frecuencia acumulada de ese rango (0,31) es muy similar al valor 0 de la frecuencia objeto acumulada (0,39). De la misma forma, el NV correspondiente al ND 30 es 1, porque ésta es la frecuencia acumulada del histograma objeto (0,78) más próxima a la frecuencia acumulada de ese ND (0,75). De la misma forma pueden realizarse el resto de los cálculos, tal y como se recoge en la tabla 6.6. Aquí sólo se presenta un fragmento de la CLUT, comprendido entre los ND 0 y 70. Similares cálculos se aplicarían al resto del rango hasta 255.

6.6.1.4.3. Expansión especial del contraste

Supone un caso particular de los métodos anteriormente estudiados. La novedad radica en restringir el contraste a un rango específico de ND, en donde se manifieste con mayor claridad una cubierta de interés. Por ejemplo, en una aplicación sobre zonas marinas, convendrá resaltar especialmente la visualización de los valores más bajos del histograma, aunque se pierda contraste en otros rangos de la imagen.

La expansión especial puede realizarse señalando un umbral máximo y mínimo, acorde con el rango digital de la cubierta que pretende realzarse (método lineal), o limitando el histograma objeto a una ventana de la imagen donde esté presente dicha cubierta. En ambos casos, esta operación supone afinar mucho más la representación visual de esa cubierta, en detrimento del contraste en otras áreas. Una muestra de este realce puede observarse en la figura 6.30, que recoge una expansión parcial del mismo sobre las zonas forestales. Como puede observarse, queda más en evidencia la variación interna de esta zona, aunque el resto

Tabla 6.6
Expansión del contraste por ecualización del histograma

ND	Frec. Rel.	Frec. Acum.	Frec. Obj.	NV	ND	Frec. Relat.	Frec. Acum.	Frec. Obj.	NV
0	0,00	0,00	0,39	0	36	2,24	10,60	14,43	26
1	0,00	0,00	0,78	0	37	2,04	12,64	14,82	31
2	0,00	0,00	1,17	0	38	2,70	15,34	15,21	38
3	0,00	0,00	1,56	0	39	1,67	17,01	15,60	43
4	0,00	0,00	1,95	0	40	1,96	18,97	15,99	48
5	0,00	0,00	2,34	0	41	2,93	21,90	16,38	55
6	0,00	0,00	2,73	0	42	2,94	24,84	16,77	63
7	0,00	0,00	3,12	0	43	2,99	27,83	17,16	71
8	0,00	0,00	3,51	0	44	2,35	30,18	17,55	78
9	0,00	0,00	3,90	0	45	3,59	33,17	17,94	86
10	0,00	0,00	4,29	0	46	2,79	35,96	18,33	92
11	0,00	0,00	4,68	0	47	2,64	38,60	18,72	100
12	0,00	0,00	5,07	0	48	1,63	40,23	19,11	104
13	0,00	0,00	5,46	0	49	2,72	42,95	19,50	111
14	0,00	0,00	5,85	0	50	2,92	45,87	19,89	119
15	0,00	0,00	6,24	0	51	2,55	48,22	20,28	125
16	0,00	0,00	6,63	0	52	2,37	50,79	20,67	131
17	0,00	0,00	7,02	0	53	2,83	53,62	21,06	138
18	0,00	0,00	7,41	0	54	3,50	57,12	21,45	147
19	0,00	0,00	7,80	0	55	2,69	59,81	21,84	154
20	0,00	0,00	8,19	0	56	1,76	61,57	22,23	159
21	0,00	0,00	8,58	0	57	2,46	64,03	22,62	165
22	0,00	0,00	8,97	0	58	2,65	66,68	23,01	172
23	0,00	0,00	9,36	0	59	2,20	68,88	23,40	178
24	0,00	0,00	9,75	0	60	2,17	71,05	23,79	183
25	0,00	0,00	10,14	0	61	2,89	73,94	24,18	191
26	0,00	0,00	10,53	0	62	1,60	75,54	24,57	196
27	0,00	0,00	10,92	0	63	1,86	77,40	24,96	199
28	0,00	0,00	11,31	0	64	1,96	79,36	25,35	204
29	0,31	0,31	11,70	0	65	2,13	81,49	25,74	209
30	0,44	0,75	12,09	1	66	1,79	83,28	26,13	214
31	0,65	1,40	12,48	3	67	1,26	84,54	26,52	218
32	1,11	2,51	12,87	5	68	1,71	86,25	26,91	222
33	1,71	4,22	13,26	10	69	1,59	87,84	27,30	226
34	2,49	6,71	13,65	16	70	1,03	88,78	27,69	229
35	1,65	8,36	14,04	20	(...)				



Fig. 6.30 - Imagen realzada mediante expansión especial sobre el rango de las áreas forestales

de la imagen pierda nitidez, como consecuencia de quedar relegada a un rango de visualización muy pequeño (fig. 6.31).

Un caso particular de este tipo de expansiones sería la binarización de la imagen. Su objeto es reducir el contraste de la imagen a dos tonos, blanco y negro, con lo que la CLUT aparece con un perfil típico de escalón. El primer "peldaño" sitúa todos los rangos que ocuparán un tono negro, y el segundo los que presentarán un tono blanco. Este tipo de procesos se utilizan para aislar un sector de ND de interés para el análisis. Por ejemplo, pueden aislarse los ND correspondientes a la zona marina, señalando un valor de 1 para todos aquellos pixels con ND por debajo de un determinado valor, y 0 para el resto. Esta imagen binarizada sirve para construir una máscara, que aísle las zonas marinas del resto, centrando sobre esa zona el resto de los tratamientos.

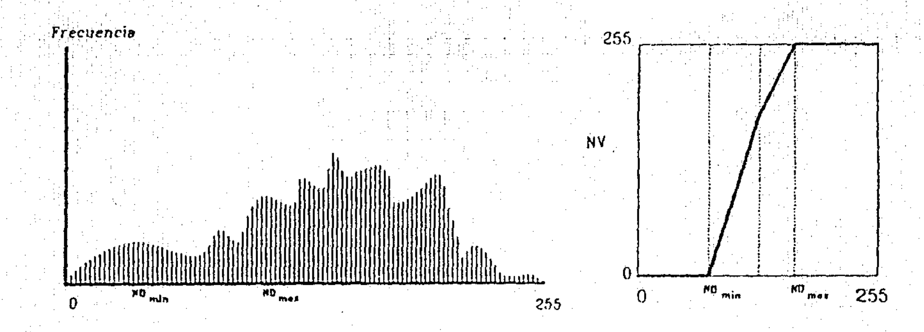


Fig. 6.31 - Histograma y CLUT para la imagen realzada

6.6.2. Empleo del pseudo-color

Varios autores han puesto en evidencia que el ojo humano es más capaz de distinguir tonos de color que intensidades de brillo (Jiménez y García, 1982). Por tanto, el empleo del color puede facilitar notablemente el análisis, tanto visual, como la preparación de otros tratamientos digitales. Utilizamos aquí el término pseudo-color para indicar aquellos tratamientos en donde se diseña artificiosamente una tabla de color. Como es bien sabido, una composición coloreada requiere el concurso de tres bandas espectrales, aplicadas a cada uno de los colores primarios (rojo, verde y azul). En consecuencia, una CLUT posee tres columnas, una para cada uno de esos colores. Cuando se visualiza una imagen en blanco y negro, esas tres columnas presentan el mismo valor, puesto que cada tono de gris supone una mezcla en partes iguales de los tres colores primarios.

Ahora bien, puede representarse asimismo una sóla banda en distintos tonos de color. Basta, para ello, diseñar una CLUT en la cual las tres columnas presenten distintos valores. En otras palabras, una CLUT que asocie el ND de una sóla banda de la imagen a distintos componentes de rojo, verde y azul. Esto puede tener sentido en dos casos: (i) cuando se pretenda obtener una clave de color en una imagen clasificada, y (ii) cuando se intente realzar el análisis de una imagen, sustituyendo los niveles de gris por tonos de color.

A modo de ejemplo, aparece en la tabla 6.7 una CLUT diseñada para representar visualmente una imagen clasificada. En ella, cada ND indica una categoría de ocupación del suelo, por lo que resulta necesario que el

Tabla 6.7
Ejemplo de CLUT para una imagen clasificada

ND	NV-Rojo	NV-Verde	NV-Azul	Color
0	0	0	0	Negro
1	255	0	0	Rojo
2	0	255	0	Verde
3	0	0	255	Azul
4	0	255	255	Cian
5	255	255	0	Amarillo
6	255	127	0	Ocre
7	127	127	127	Gris
8	255	0	127	Rosa

color finalmente representado en pantalla tenga relación con el significado de dicha cubierta. Por ejemplo, si el ND 1 indica zonas urbanas, convendrá que se visualice en color rojo, para lo que basta indicar en la CLUT, para ese valor, una intensidad máxima de rojo y una mínima de verde y azul. De la misma forma, el ND 2, que representa cubierta vegetal se visualiza en verde, con mínimo de rojo y azul; el ND 3 hace referencia a las masas de agua y tiene máximo de azul y mínimo de rojo y verde, y así sucesivamente hasta completar la gama requerida. La posible paleta de color se eleva a unas 16 millones de tonalidades, aunque, lógicamente, bastan unos cuantos colores para construir una clave de color apropiada a las clasificaciones temáticas.

Cuando se visualiza una imagen monocromática en distintas tonalidades se emplea propiamente el pseudo-color. El sentido de esta representación visual, como ya se ha dicho, es realzar el análisis de cada banda, facilitando al usuario una primera impresión sobre su interés para discriminar el fenómeno objeto de estudio. El pseudo-color puede aplicarse al conjunto de los ND de la escena, diseñando una CLUT formada, por ejemplo, por números aleatorios entre 0 y 255, para cada uno de los tres colores. Más frecuente es, sin embargo, aplicar una transformación del color progresiva, en donde la CLUT tiene una dirección determinada de progresión: desde los tonos azules para los ND bajos hasta los rojos, para los más altos. Aunque esta transformación suele incorporarse en la mayor parte de los equipos de tratamiento, no existen muchas referencias sobre su aplicación práctica.

Más sentido tiene, en cambio, aplicar un color a un determinado

rango de ND, de tal forma que, por un lado, se simplifica el rango inicial en un número menor de intervalos, y, por otro, se aplica a éstos un color, más fácil de discriminar visualmente que los niveles de gris. En definitiva, se trata de establecer intervalos de densidad (*density slicing*) en cada banda. Este nombre se emplea para indicar, que cada uno de esos grupos corresponde a valores de radiancia relativamente similares. Los umbrales que definen cada intervalo pueden establecerse arbitrariamente o con algún criterio estadístico: por ejemplo, señalando una anchura constante a partir del rango, o seleccionando intervalos de la misma frecuencia. En cualquier caso, los umbrales elegidos pueden modificarse interactivamente, con lo que el usuario puede detectar, en cada banda, el rango de ND que comprende un fenómeno de interés. Asimismo, le facilita un primer balance de los solapes con otras categorías, de cara a su clasificación digital (6.8.2).

6.6.3. Composiciones en color

A partir de la información multi-espectral que generan la mayor parte de los sensores espaciales, pueden obtenerse distintas composiciones de color. Basta para ello aplicar cada uno de los tres colores primarios (azul, verde y rojo) a una banda distinta de la imagen, seleccionada con el criterio y en el orden que se estime más oportuno. El proceso permite visualizar, simultáneamente, imágenes de distintas regiones del espectro, lo que facilita la delimitación visual de algunas cubiertas. Por tratarse de bandas distintas, la CLUT aplicada a una composición en color presente tres columnas con distintos valores. Normalmente éstos se corresponden con los obtenidos en una expansión del contraste, aplicada previamente a cada una de las tres bandas que intervienen en el proceso.

La elección de las bandas para realizar la composición, y el orden de los colores destinados a cada una, dependen del sensor sobre el que se trabaje y de la aplicación última del proyecto. Como ya vimos anteriormente (5.2.2), la composición más habitual es la denominada falso color, fruto de aplicar los cañones de color rojo, verde y azul sobre las bandas correspondientes al infrarrojo cercano, rojo y verde, respectivamente. Esta composición facilita la cartografía de masas vegetales, láminas de agua, ciudades, etc., de ahí que se haya empleado profusamente en diversos estudios de análisis visual.

El sensor TM, dotado de 7 bandas espectrales, ofrece la posibilidad de realizar un amplio número de composiciones coloreadas. A partir de su puesta en órbita, se han desarrollado diversos métodos para seleccionar

aquella que albergue un mayor contenido informativo. Se trata de identificar la composición multibanda que, entre las 35 posibles (3 de 7 bandas), recoja mejor la estructura del conjunto de la imagen. Una forma de selección parte de retener las tres bandas con un mayor contenido de la varianza original. De esta forma se define el denominado 'Índice óptimo' (*Optimum Index Factor*, OIF):

$$OIF = \frac{\sum_{k=1}^{3} s_k}{\sum_{j=1}^{3} Abs\,(r_j)} \qquad [6.29]$$

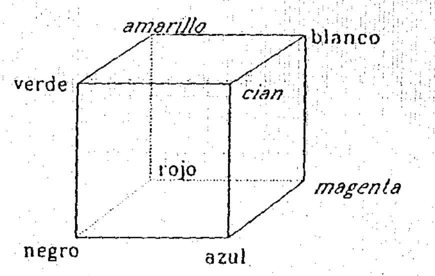
donde s_k indica la desviación típica de cada una de las tres bandas que intervienen en la composición y r_j el coeficiente de correlación entre cada par de esas mismas bandas (Jensen, 1986, pp. 89-91).

Otros métodos propuestos para seleccionar la composición en color idónea tienen en cuenta el elipsoide de máxima variación, que supone un planteamiento novedoso frente a los métodos estadísticos convencionales (Sheffield, 1985; Hord, 1986, pp. 139-47), y el valor de la divergencia (Mather, 1987, pp. 320-323). Los resultados de estas técnicas muestran una tendencia similar. En la mayor parte de los casos, la composición elegida incluye una banda en el visible, otra en el infrarrojo cercano y otra en el medio, identificando así los tres ejes principales de variación en una imagen TM.

6.6.4. Transformación HSI

Hasta aquí hemos visto composiciones coloreadas basadas en los tres colores primarios. Una forma alternativa de representar el color atiende no a sus componentes sino a sus propiedades. Se trata de la transformación Tono, Saturación, Intensidad (HSI, *Hue, Saturation, Intensity*), de reciente empleo en aplicaciones de teledetección, pero que ya ha mostrado su interés para aplicaciones geológicas (Terhalle y Bodechtel, 1986) y para combinar imágenes adquiridas por distintos sensores (Blom y Daily, 1982; Chavez, 1986)

El tono procede de la longitud de onda en donde se produce la máxima reflectividad del objeto: equivale al color que aprecian nuestros



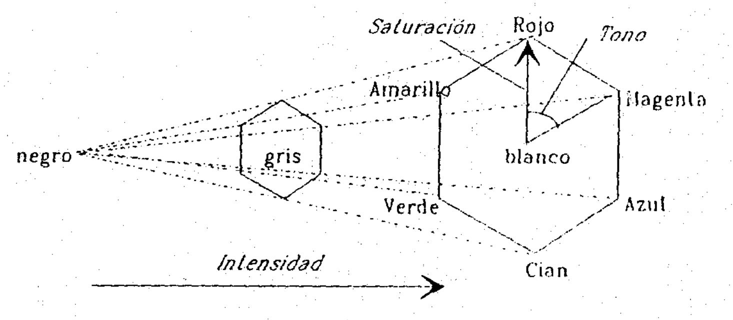


Fig. 6.32 - Representación gráfica del color a partir de las coordenadas RGB y HSI

ojos. La saturación refiere a la pureza de dicho color, su grado de mezcla con colores vecinos. Por último, la intensidad puede identificarse con brillo, en función del porcentaje de reflectividad recibido.

Es posible transformar las coordenadas de la imagen de los colores primarios (RGB) a las propiedades del color (HSI). En el primer caso, cada pixel puede representarse en un cubo de tres ejes (rojo, verde y azul). En el segundo, por un hexacono, en donde la cara hexagonal sería el tinte, el eje vertical la saturación, y la distancia al eje vertical el brillo (fig 6.32). La transformación entre coordenadas RGB y HSI puede abordarse gracias a distintos algoritmos de conversión. Uno sencillo, propuesto por Mather (1987, p. 230), sería el siguiente:

(i) Se transforman los valores de rojo, verde y azul (RGB) desde la escala original, 0-255, a otra comprimida, 0-1.

(ii) Para cada pixel, se define Intensidad (I) como el valor máximo de los tres ND que intervienen en la composición RGB que quiere transformarse.

(iii) Se define M como el valor mínimo de esos mismos ND.

(iv) Se define el Rango (R) como I - M.

(v) Se define la Saturación (S) como R/I, siempre que I no sea igual a 0, en cuyo caso S = 0.

(vi) Si $S \neq 0$ se calculan $R1 = (I - ND_{rojo})/R$; $G1 = (I - ND_{verde})/R$; y $B1 = (I - ND_{azul})/R$.

(vii) Si I coincide con el color rojo y M es el verde, entonces el tono (*hue*) se define como $H = 5 + B1$. Caso de que M sea el azul, entonces $H=1-G1$.

(viii) Si I coincide con el color verde y M con el azul, entonces $H=1+R1$. Caso de que M sea el rojo, entonces $H = 3 - B1$.

(ix) Por último, si I coincide con el color azul y M con el rojo, entonces $H = 3 + G1$. Si M es el color verde $H = 5 - R1$.

(x) Finalmente H se multiplica por 60, y se escala el resultado de I, S y H entre 0 y 255 para su representación en pantalla.

Como ya comentamos, la transformación HSI ha sido bastante utilizada con fines geológicos. Por ejemplo, Terhalle y Bodechtel (1986) ilustran el uso de esta transformación para la cartografía de rasgos morfológicos en zonas áridas.

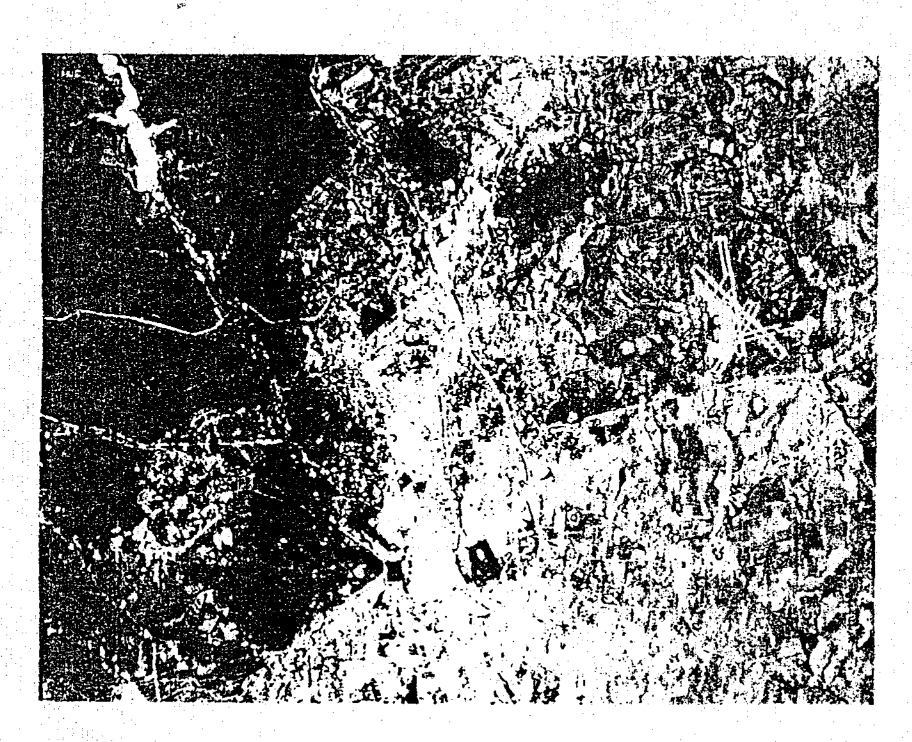


Fig. 6.33a - Imagen correspondiente al Tono de la composición en Falso Color

En otro contexto, se ha empleado con frecuencia para mezclar imágenes procedentes de sensores de distinta resolución espacial. Un caso muy reciente, ha sido la fusión entre imágenes pancromáticas SPOT-HRV (10 m) e imágenes multi-espectrales TM (30 m). En primer lugar, ambas imágenes se rectifican geométricamente, de tal forma que puedan superponerse. En esa corrección, la imagen TM se amplia a un pixel de 10 m, para igualar el tamaño del pixel SPOT. A continuación, la composición coloreada de la imagen TM se transforma a los componentes HSI. Por cuanto el tono y la saturación refieren al contenido espectral de la imagen, mientras la intensidad se relaciona más con el componente espacial, basta sustituir este último componente por la imagen SPOT, de tal forma que se incorpora el detalle espacial de ésta sin perder la resolución espectral del TM. Por último, se aplica la transformación inversa, de componentes HSI a RGB, obteniéndose un producto visual muy mejorado. Similares experiencias se han practicado con otros sensores (Chavez, 1986; Arbiol et al, 1989).



Fig. 6.33b - Imagen correspondiente a la Saturación de la composición en Falso Color

Un ejemplo de transformación HSI puede analizarse en las figuras 6.33 y 6.34*. La composición original corresponde a un falso color TM 4/3/2, a partir de la cual se han generado los tres componentes físicos: Tono, Saturación e Intensidad, más una combinación coloreada de los tres componentes. La imagen del Tono ofrece los valores más altos para la superficie urbana y el agua, lo que indica que el color dominante de la imagen original corresponde a las superficies mas reflectivas en las bandas cortas. La correspondiente a Saturación muestra también valores altos para el agua, mientras la ciudad y suelos desnudos aparecen en grises oscuros o negros. La vegetación ofrece valores altos en este componente, como consecuencia de su clara cromaticidad. En cuanto a la imagen de la Intensidad, aisla el componente más brillante de las tres bandas; esto es, el ND máximo de las tres para cada pixel. En consecuencia, los suelos desnudos presentan los valores más altos, junto a la vegetación muy vigorosa o las superficies pavimentadas (aeropuerto de Barajas).



Fig. 6.33c - Imagen correspondiente a la Intensidad de la composición en Falso Color

La composición coloreada de los tres componentes ofrece una representación original de la información almacenada en las bandas 4, 3 y 2. La vegetación ofrece una clara tonalidad verde (Saturación), que se dirige hacia el amarillo para las áreas de mayor vigor (Saturación + Intensidad). El agua, por su parte, presenta tonos cian (Saturación + Tono), mientras la ciudad ofrece tintes azules (Tono), y los suelos desnudos recogen tonalidades rojo o magenta (Intensidad + Tono).

6.6.5. Cambios de escala

Conviene manejar con cierta precaución el concepto de escala cuando se habla de sensores óptico-electrónicos. Como ya hemos visto, la escala final de la imagen está en función del tamaño con el que representemos el pixel, unidad mínima de información. Ahora bien, la superficie real que ocupa el pixel es la misma, así como el ND que lo define, independientemente del tamaño con el que éste se represente sobre el monitor o el papel.

Hecha esta aclaración, obvia decir que en muchas situaciones el tratamiento digital de imágenes requiere aumentar o disminuir el tamaño del pixel en pantalla. Por cuanto la resolución física del monitor es constante (sólo admite un número determinado de pixels), el cambio de escala debe realizarse a través del muestreo o replicación de los pixels que componen la imagen.

Si pretende visualizarse un área con un número de pixels superior a la capacidad de la pantalla, basta seleccionar una muestra de la imagen original. En pocas palabras, se trata de escoger uno de cada dos, tres o cuatro pixels en la imagen, para que pueda visualizarse sobre el monitor un área cuatro, nueve o dieciséis veces más grande (fig. 6.35). Naturalmente que esto supone hacerlo con menos detalle, ya que se está seleccionando sólo una parte de los ND originales. Sin embargo, el proceso es muy útil en algunas instancias: por ejemplo, cuando se pretende localizar una pequeña área de estudio sobre una escena completa. Así, los programas de lectura de imágenes en cinta incluyen una rutina para saltar n filas y columnas, con objeto de visualizar en pantalla un área más amplia de la que permitiría el monitor. Sobre esa mayor superficie puede situarse el área de interés, elegir sus coordenadas, y proceder a la lectura, pixel a pixel, sólo del sector de la imagen.

El proceso contrario a la reducción se denomina magnificación, ampliación, o, simplemente, *zoom*. Se trata de ampliar el tamaño del

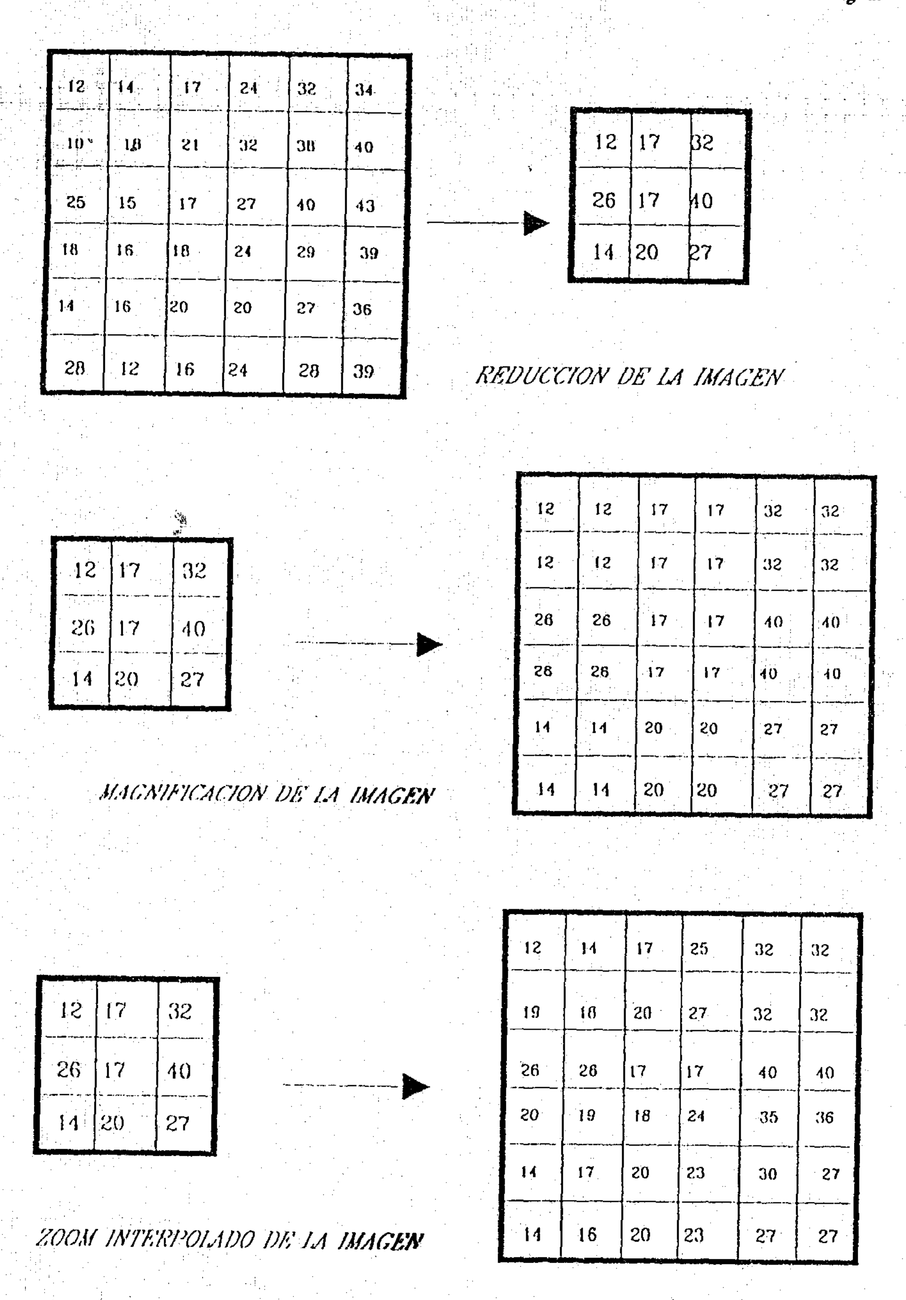


Fig. 6.35 - Efecto de los cambios de escala

pixel sobre el monitor, con objeto de estudiar una parte de la imagen con mayor detalle. Constituye una de las opciones más frecuentes en tratamiento digital, puesto que facilita operaciones muy comunes como son la localización de puntos de control (6.5.3.1), o el establecimiento de campos de entrenamiento (6.8.2.2).

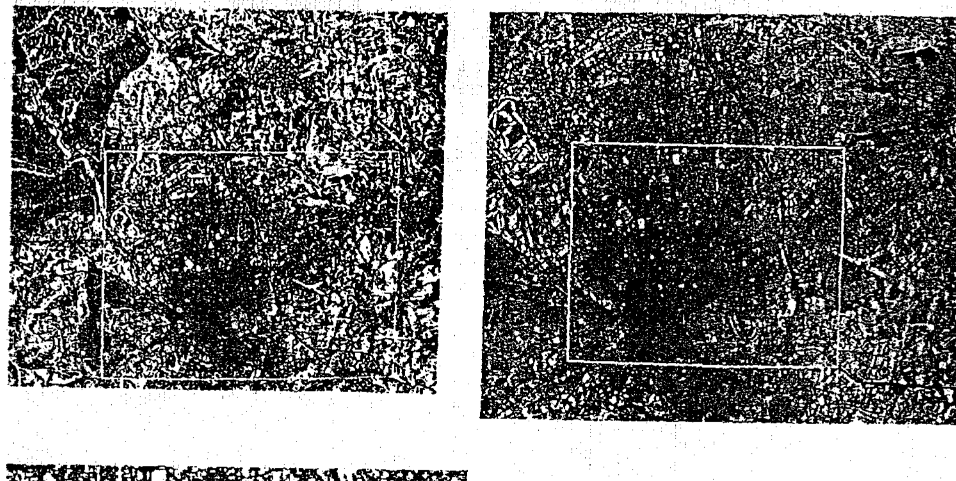
La ampliación suele realizarse en la memoria del procesador de imagen o tarjeta gráfica. En realidad los pixels mantienen su posición y valor; sólo cambian su tamaño sobre la pantalla. Esta forma de zoom (vía *hardware*) es rápida e interactiva: puede magnificarse la imagen repetidas veces, retornando rápidamente, y en cualquier momento, al tamaño original.

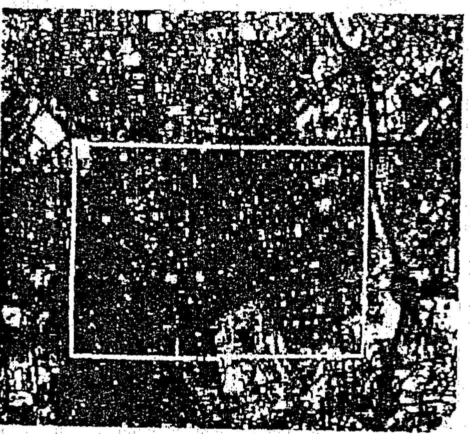
Realizar un zoom mediante instrucciones de programa resulta más tedioso, aunque es un proceso bastante trivial. Basta reduplicar cada pixel tantas veces como se pretenda ampliar el área visualizada (fig. 6.35). Este criterio, al igual que el zoom por *hardware*, acaba por hacer patente la forma rectangular de los pixels. La imagen pierde, entonces, su nitidez espacial y puede mostrar un trazado muy geométrico (fig. 6.36). Una ampliación de mayor calidad visual puede lograrse mediante un zoom interpolado. Aquí, en lugar de una simple replicación de los ND originales, se crea una nueva matriz de tamaño equivalente al nivel de magnificación. En esta matriz se sitúan los ND originales, y se calculan los otros por interpolación lineal de estos valores. La impresión que causa sobre la pantalla es la de una imagen mucho más nítida, puesto que mantiene una mejor transición entre pixels vecinos.

6.6.6. Filtrajes

6.6.6.1. Naturaleza de un filtro digital

Al igual que en las técnicas fotográficas convencionales, el filtro se aplica en análisis digital para aislar componentes de interés. En este caso, los filtros aplicados sobre la imagen pretenden suavizar o reforzar los contrastes espaciales presentes en los ND que la componen. En otras palabras, se trata de transformar los ND originales, de tal forma que se asemejen o diferencien más de los correspondientes a pixels vecinos. Como quiera que estos contrastes espaciales pueden también concebirse como variaciones en la frecuencia, suele hablarse de dos tipos de filtros: en el dominio de la frecuencia y en el dominio espacial. Entre ellos, nos detendremos más en el segundo grupo, puesto que es son los más empleados en aplicaciones de la teledetección espacial.





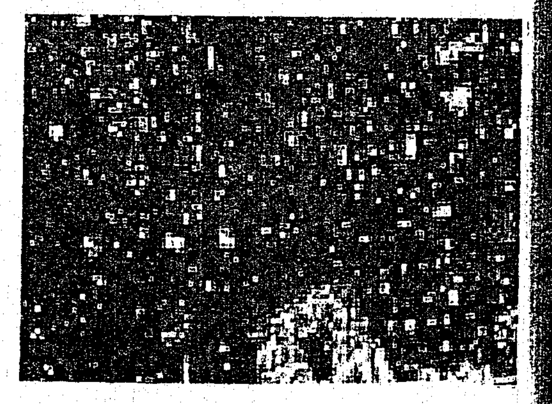


Fig. 6.36 - Imagen de Madrid con distintos niveles de magnificación

Hemos incluido los filtros digitales en este capítulo, porque las técnicas de filtraje se dirigen, directamente, al realce visual de la imagen. Al igual que las operaciones antes comentadas, pretenden mejorar la visualización de las imágenes, ya sea para eliminar valores anómalos, ya para resaltar rasgos lineales de interés. Sin embargo, a diferencia de las operaciones ya comentadas, el filtraje implica modificar los ND originales, y no sólo la forma en que se representan visualmente. En otras palabras, no se trata sólo de transformar los NV almacenados en las CLUT, sino también los mismos ND de la imagen. Por tanto, si pretende abordarse una clasificación digital, las imágenes filtradas no resultan, en

principio, muy convenientes, aunque refuercen visualmente rasgos de interés respecto a la imagen original.

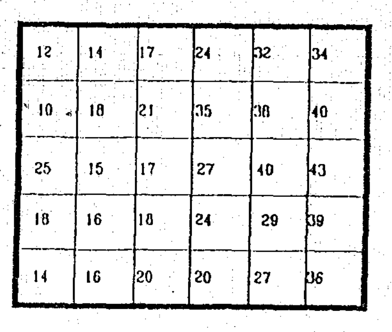
De acuerdo al objetivo que se persiga, suelen distinguirse dos tipos de filtros: (i) filtros de paso bajo (*low pass filtering*), que tienden a aislar el componente de homogeneidad en la imagen, seleccionando áreas donde la frecuencia de cambio es baja, y (ii) filtros de paso alto (*high pass filtering*), dirigidos a los componentes de alta frecuencia: esto es, a aquellas áreas de alta variabilidad, donde el contraste espacial es intenso.

Ambos tipos de filtrado pueden abordarse con el mismo método. Si el objetivo último es poner a los pixels de la imagen en relación con sus vecinos (ya sea para homogeneizarlos, ya para diferenciarlos), basta realizar una serie de operaciones aritméticas entre cada uno de ellos y sus inmediatos. La forma concreta de efectuar este proceso es aplicar sobre los ND originales una matriz móvil de coeficientes de filtraje (CF). Esta matriz (denominada, por algunos autores, *kernel*) puede tener un tamaño variable, en función del número de pixels vecinos que queramos implicar en el proceso. Lo habitual es que se trate de una matriz de 3 x 3 CF, que se aplica sucesivamente a todos los pixels de la imagen. Puede también disponerse de matrices de filtraje mayores, de 5 x 5 ó 7 x 7 pixels. Cuanto mayor sea ésta, el efecto suavizado o realce espacial es más intenso, al considerar un mayor número de pixels vecinos.

En cualquier caso, la matriz de CF se aplica sucesivamente a la imagen original, desplazándose un pixel en cada paso. Conviene insistir que sólo se modifica el ND del pixel central, entre los que son afectados en cada momento por la matriz de filtraje. El sentido de esa transformación depende del tipo de CF señalados por el usuario. Si éstos tienden a ponderar el valor central en detrimento de los externos, el pixel refuerza sus diferencias frente a los vecinos. Por el contrario, si los coeficientes favorecen a los pixels externos, el central se asemejará más a los adyacentes. Obvia decir que en el primer caso nos encontraríamos ante un filtro de paso alto, mientras en el segundo sería de paso bajo.

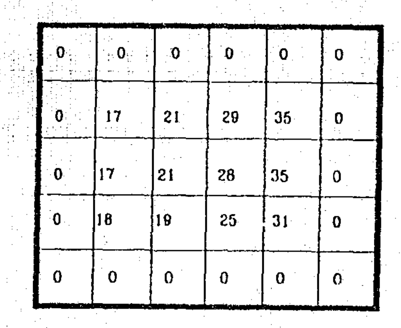
El procedimiento matemático del filtraje consiste en relacionar cada pixel con sus vecinos, de acuerdo a unos coeficientes determinados por el usuario. Estos marcan, en última instancia, las consecuencias del filtraje. En el caso de una matriz de 3 x 3 CF, la fórmula genérica sería:

$$ND'_{ij} = \left(\sum_{p=-1}^{1} \sum_{q=-1}^{1} ND_{i+p,j+q} \; CF_{f+p,c+q} \right) / \sum_{p=-1}^{1} \sum_{q=-1}^{1} CF_{f+p,c+q} \qquad [6.30]$$



12	14	17	24	32	34
10	18	21	35	38	40
25	15	17	27	40	43
18	16	18	24	29	39
14	16	20	20	27	36

1	1	1
1	2	1
1	1	1



0	0	0	0	0	0
0	17	21	29	35	0
0	17	21	28	35	0
0	18	19	25	31	0
0	0	0	0	0	0

Fig. 6.37 - Ejemplo de filtraje digital

en donde ND_{ij} indica el ND original del pixel i,j; ND'_{ij}, el ND de salida para ese mismo pixel; CF, el coeficiente de filtraje correspondiente, y f y c la fila y columna central de la matriz de filtraje. El resultado de esta fórmula se aproxima al entero más cercano.

El proceso abordado en un filtraje puede ilustrarse con un sencillo ejemplo. Se pretende aplicar un filtro de paso bajo a una pequeña imagen de 5 x 6 pixels, empleando la fórmula anterior sobre una matriz de 3 x 3 CF (fig. 6.37). Este sencillo ejemplo sirve para extraer algunas consideraciones de interés. En primer lugar, se observa que el área filtrada se limita a los pixels centrales. Los pixels de borde no se afectan por el proceso, puesto que no tienen los 8 vecinos necesarios para realizar el cálculo. Esta característica es común a cualquier filtraje, ya sea de paso alto o bajo. Obviamente, en el caso de una imagen de mayor tamaño (512 x 512 pixels, por ejemplo), la pérdida de esos pixels de borde no supone una grave inconveniencia[2]. Otros autores prefieren aplicar algún promedio especial a estos pixels, en lugar de igualarlos a cero.

Volviendo a nuestro ejemplo, el nuevo ND del pixel central se calcula por un promedio de los 8 vecinos, con una pequeña ponderación del valor central. Esos coeficientes se han aplicado a todos los pixels centrales de la imagen. Por ejemplo, el situado en la fila 3, columna 3, con un ND inicial de 17 se convierte en la nueva imagen en:

[2] En una matriz de filtraje de 3 x 3 se pierden la primera y última fila y columna. Si empleamos matrices de mayor tamaño, la merma será más significativa: con 5 x 5, se perderían las dos primeras y últimas; con 7 x 7 las tres, etc.

$$ND'_{33} = (18+21+35+15+2x17+27+16+18+24)/10 = 20,8 \approx 21$$

que es un valor más cercano al sector oriental de la imagen, con valores bajos. De igual forma se procede con el resto de los pixels hasta obtener la imagen filtrada. El contraste global se ha reducido: mientras la desviación típica original de los 12 pixels afectados por el filtraje es 8,91, la correspondiente a los filtrados es 6,77, lo que indica una mayor homogeneidad en la nueva imagen. Un efecto más claro se hubiera obtenido al analizar una mayor superficie y/o aplicar un promedio simple en la matriz de CF. Un proceso similar se emplearía para cualquier otro tipo de filtraje.

6.6.6.2. Filtros de paso bajo

Tienen por objetivo suavizar los contrastes espaciales presentes en la imagen. En breves palabras, se trata de asemejar el ND de cada pixel al de los pixels vecinos, reduciendo la variabilidad espacial de la escena. En términos visuales, esto supone que la imagen filtrada ofrece perfiles menos nítidos, más difuminados, como puede apreciarse en la figura 6.38, correspondiente a la banda 2 de la imagen que venimos comentando. El efecto resultará más patente cuando se compare con la figura 6.26, que recoge la misma banda con los ND originales.

Este tipo de filtraje se utiliza para restaurar los errores aleatorios que pueden presentarse en los ND de la imagen, fruto de un defecto en la adquisición o recepción de los datos (6.5.2.1). Asimismo, se ha empleado para reducir la variabilidad espacial de algunas categorías, como paso previo a la clasificación. En este caso, se pretende atenuar el denominado "ruido de la escena", producido en las zonas altamente heterogéneas en relación con la resolución espacial del sensor. El caso más claro, y el más estudiado, es el que se produce en las zonas urbanas, en donde se mezclan distintos tipos de cubierta en un reducido espacio. Para disminuir esta variabilidad espacial, se han propuesto diversos filtros de paso bajo, que tienden a homogeneizar los ND de esas zonas. El efecto de estos filtros se ha mostrado bastante eficiente de cara a la clasificación digital (Haack et al, 1987; Cushnie y Atkinson, 1985).

El filtro de paso bajo puede obtenerse a partir de diversas matrices de filtraje. Algunas de las más habituales son:

	1.00	1.00	1.00		0.25	0.50	0.25		1.00	1.00	1.00
(1)	1.00	1.00	1.00	(2)	0.50	1.00	0.50	(3)	1.00	2.00	1.00
	1.00	1.00	1.00		0.25	0.50	0.25		1.00	1.00	1.00

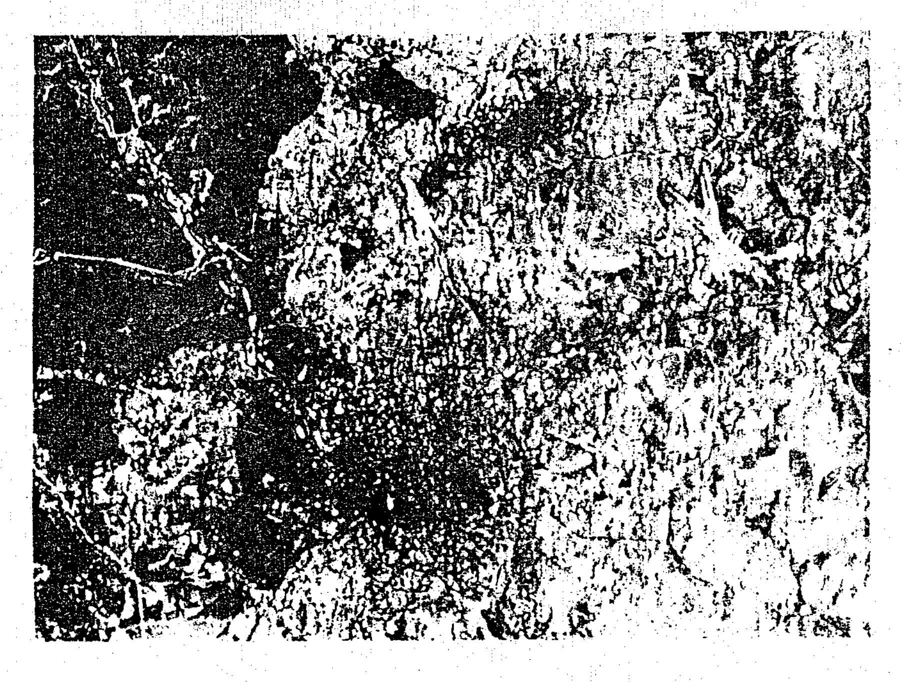


Fig. 6.38 - Filtro de paso bajo sobre la imagen de Madrid

La primera es un simple promedio de los 9 pixels que componen la ventana de filtraje, mientras las dos segundas matrices ponderan el valor central para evitar una excesiva pérdida de detalle.

En los últimos años se ha aplicado con bastante rendimiento otro tipo de filtraje, basado sobre la mediana en lugar de la media. El filtro mediano, se basa en sustituir el ND del pixel central por la mediana de los ND correspondientes a los pixels vecinos. Su interés se corresponde con el propio de la mediana como medida de centralidad: es menos sensible a los valores extremos y entraña una menor modificación de los datos que la media aritmética: de ahí que se haya recomendado su empleo dentro de las técnicas de análisis exploratorio de datos (Tukey, 1977). En el contexto del tratamiento digital de imágenes, se ha empleado para eliminar valores anómalos aislados, fruto de ruidos aleatorios en la adquisición de los datos. Preserva mejor los contornos que el filtro promedio, pero demanda un mayor volumen de cálculo, lo que dificulta su aplicación cuando los recursos informáticos son escasos. Se ha aplicado con éxito para reducir el moteado brillante de las imágenes rádar (Blom y Daily, 1982).

6.6.6.3 Filtros de paso alto

Este tipo de filtros pretende aislar los componentes de alta frecuencia en una imagen. En términos espaciales, esto supone remarcar digitalmente los contrastes espaciales entre pixels vecinos, enfatizando los rasgos lineales presentes en la imagen, como carreteras, parcelas o accidentes geológicos. En definitiva, se intenta reforzar los contornos entre áreas homogéneas, evidenciando cualquier discontinuidad.

Varios métodos pueden conseguir este objetivo. El más sencillo pasa por restar de la imagen original la obtenida por un filtro de paso bajo. La razón es bastante obvia: si lo que se pretende es aislar los componentes de alta frecuencia (alta variabilidad), basta restar de la imagen original aquellos correspondientes a la baja frecuencia, con lo que sólo quedarían los requeridos, que se añadirían a la imagen original. En suma:

$$ND'_{i,j} = ND_{i,j} + (ND_{i,j} - ND^{L}_{i,j}) \qquad [6.31]$$

donde ND' corresponde al ND de salida, ND al original, y ND^L al resultado de un filtro de paso bajo.

Más común es, sin embargo, emplear matrices de filtraje, similares a las anteriormente analizadas. En este caso, los CF se disponen de tal modo que se refuerza el contraste entre el pixel central y los vecinos. Dos matrices frecuentemente utilizadas son:

	-1	-1	-1		0	-1	0
(4)	-1	9	-1	(5)	-1	5	-1
	-1	-1	-1		0	-1	0

ambas se derivan del análisis de gradientes de cambio en la imagen. El segundo filtro, denominado Laplaciano, se recomienda para el realce de rasgos lineales en la ciudad (Jensen, 1986).

Puede analizarse la aplicación de este filtro sobre la imagen de Madrid en la figura 6.39. El proceso implica una mayor nitidez para los abundantes rasgos lineales de la imagen: carreteras y líneas de ferrocarril, aeropuertos, caminos, etc. Precisamente esta abundancia de líneas explica que la imagen resultante aparezca un tanto confusa, ya que el filtro realza los numerosas trazos limítrofes de la zona, perdiendo en claridad las áreas internas a esos límites.

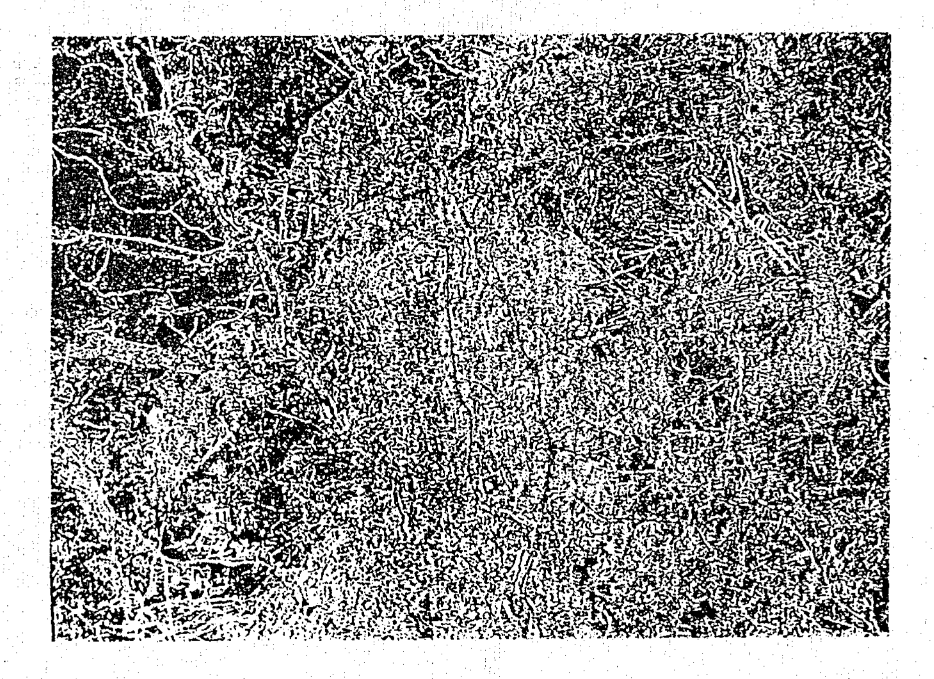


Fig. 6.39 - Filtro de paso alto sobre la imagen de Madrid

Las matrices de filtraje antes comentadas permiten subrayar cualquier rasgo fronterizo de la imagen, independientemente de su orientación. La misma técnica puede emplearse para construir filtros direccionales, con el propósito de reforzar aquellas líneas que sigan determinadas orientaciones. Basta disponer adecuadamente los CF, distribuyendolos en sectores de la matriz. Algunos ejemplos de matrices de filtraje para conseguir este análisis direccional son:

	NORTE		SUR		ESTE		OESTE
	1 1 1		-1 -1 -1		-1 1 1		1 1 -1
(6)	1 -2 1	(7)	1 -2 1	(8)	-1 -2 1	(9)	1 -2 -1
	-1 -1 -1		1 1 1		-1 1 1		1 1 -1

	NORESTE		SURESTE		SUROESTE		NOROESTE
	1 1 1		-1 -1 1		1 -1 -1		1 1 1
(10)	-1 -2 1	(11)	-1 -2 1	(12)	1 -2 -1	(13)	1 -2 -1
	-1 -1 1		1 1 1		1 1 1		1 -1 -1

La figura 6.40 recoge la aplicación de estos filtros direccionales a una sub-imagen de la escena de Madrid. Se trata de un sector del centro de la ciudad correspondiente a la banda 4. Sobre esta zona se han aplicado los ocho filtros mencionados previamente. El lector podrá comprobar por sí mismo la influencia de las distintas matrices de filtraje sobre la imagen, reforzando las calles que siguen la principal dirección del filtraje.

Algunos autores han recomendado el empleo de filtros no lineales para reforzar fronteras o rasgos de interés en la imagen. Uno de los más empleados, en este sentido, es el denominado detector de bordes de Sobel (Gonzalez y Wintz, 1977), que relaciona la variación entre filas y colum-

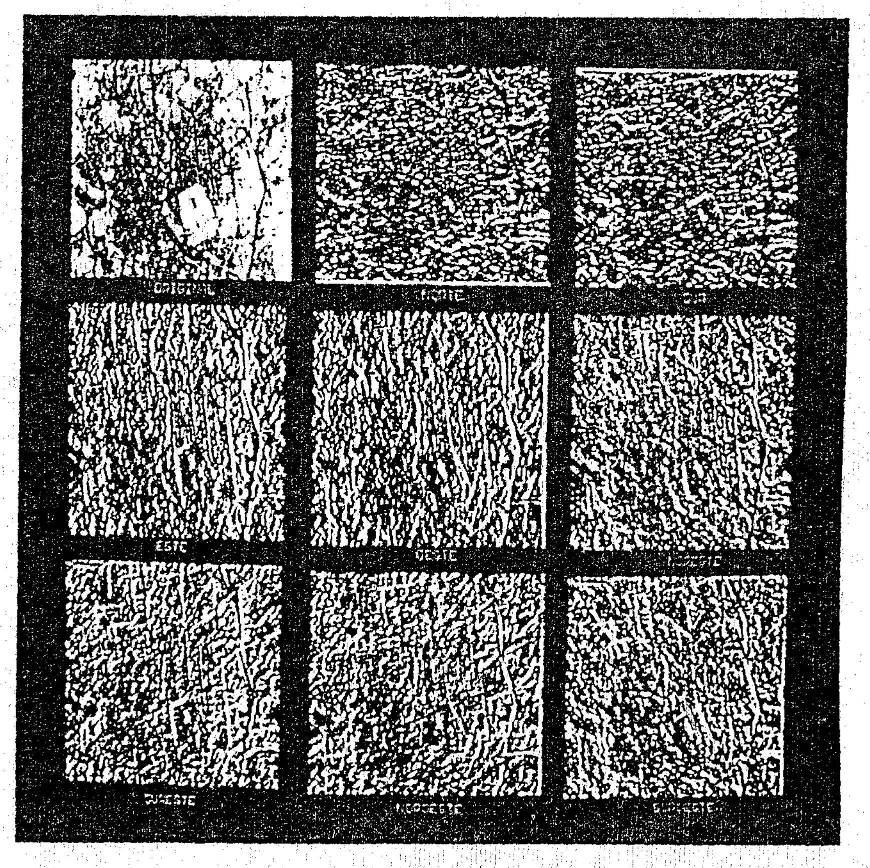


Fig. 6.40 - Efecto de filtros direccionales

nas de la matriz de filtraje. En una ventana de 3 x 3 pixels, el ND del pixel central se calcula de la forma siguiente:

$$ND'_{i,j} = \sqrt{(C^2 + F^2)} \qquad [6.32]$$

donde:

$$C = (ND_{i-1,j+1} + 2\ ND_{i,j+1} + ND_{i+1,j+1}) - (ND_{i-1,j-1} + 2\ ND_{i,j-1} + ND_{i+1,j-1})$$

y

$$F = (ND_{i-1,j-1} + 2\ ND_{i-1,j} + ND_{i-1,j+1}) - (ND_{i+1,j-1} + 2\ ND_{i+1,j} + ND_{i+1,j+1})$$

En ocasiones estos filtros de paso alto se enmarcan dentro de una técnica denominada realce de bordes (*edge enhancement*), dirigida a subrayar los cambios espaciales presentes en la imagen. Además de los filtros arriba expuestos, una forma sencilla de realzar los bordes sería realizar una copia de la imagen, desplazarla una fila y/o columna sobre la original y restar ambas. Aquellos pixels que ofrezcan un valor cercano a 0 indicarán áreas de escasa variación, mientras cuanto mayor sea esta diferencia, mayor será también el contraste especial entre pixels vecinos. Asimismo puede definirse una dirección de contraste, hacia valores superiores o inferiores según sea negativa o positiva la diferencia. Otros métodos de detección de bordes han sido desarrollados para aplicaciones específicas, como son la detección de lineamientos (Moore y Waltz, 1983), o el realce de plumas de agua (Jensen, 1986, pp. 144-151). Filtros en el dominio de la frecuencia pueden estudiarse en Gonzalez y Wintz (1977) y Schowengerdt (1983).

6.7. TRANSFORMACIONES DE LA IMAGEN

6.7.1. Introducción

Se incluyen en este capítulo aquellas operaciones dirigidas a crear bandas artificiales, a partir de combinaciones entre las originales, con objeto de mejorar la discriminación de algunos aspectos temáticos dentro de la imagen. Dicho brevemente, son transformaciones dirigidas hacia la clasificación temática, ya sea ésta visual o digital. Obviamente, tales operaciones no proporcionan una nueva información que no estuviera ya incluida en los datos originales. Permiten, no obstante, mejorar la disposición de los datos, de forma que sean más evidentes determinados fenómenos de interés.

La mayor parte de las transformaciones hasta ahora empleadas en teledetección son lineales. En otras palabras, esas nuevas bandas se crean por combinación lineal de las originales: sumas ponderadas, multiplicaciones o divisiones, son las más habituales. Para acotar nuestro comentario, nos ceñiremos a aquellas transformaciones que cuentan con una mayor tradición en aplicaciones medio ambientales de la teledetección espacial.

6.7.2. Cocientes e índices de vegetación

Como su nombre indica, un cociente o ratio implica efectuar una división, pixel a pixel, entre los ND almacenados en dos o más bandas de la misma imagen.

Su empleo se justifica en dos situaciones: (i) para mejorar la discriminación entre suelos y vegetación, y (ii) para reducir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de distintas cubiertas.

El empleo de los cocientes para discriminar masas vegetales se deriva del peculiar comportamiento radiométrico de estas cubiertas (fig. 5.41). Como se recordará (2.5.2), la signatura espectral característica de la vegetación sana muestra un claro contraste entre las bandas visibles -y especialmente la banda roja (0,6 a 0,7 μm)- y las comprendidas en el infrarrojo cercano (0,7 a 1,1 μm). Mientras en la región visible, los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la luz que reciben (para realizar la función clorofílica), en el infrarrojo cercano estas sustancias son bastante transparentes. Por esta razón, la vegetación sana ofrece baja reflectividad en la banda roja del espectro y alta en el infrarrojo cercano. El contraste con la vegetación enferma, y sobre todo con los suelos, es bastante evidente en estas dos bandas. Los suelos, poco cromáticos, ofrecen menor variación espectral a distintas longitudes de onda, apareciendo con una curva mucho más plana (2.5.3). En definitiva, podemos enunciar, como principio general, que cuanto mayor sea el contraste entre los ND de la banda infrarroja y roja, mayor vigor vegetal presentará la cubierta observada. Bajos valores de contraste indican una vegetación enferma o senescente, hasta llegar a las cubiertas sin vegetación, que ofrecen un contraste muy pequeño.

En este principio se apoya la mayor parte de los denominados índices de vegetación, en los que se combinan la banda roja (R) e infrarrojo cercano (IR) del espectro. Los más empleados son el simple cociente en-

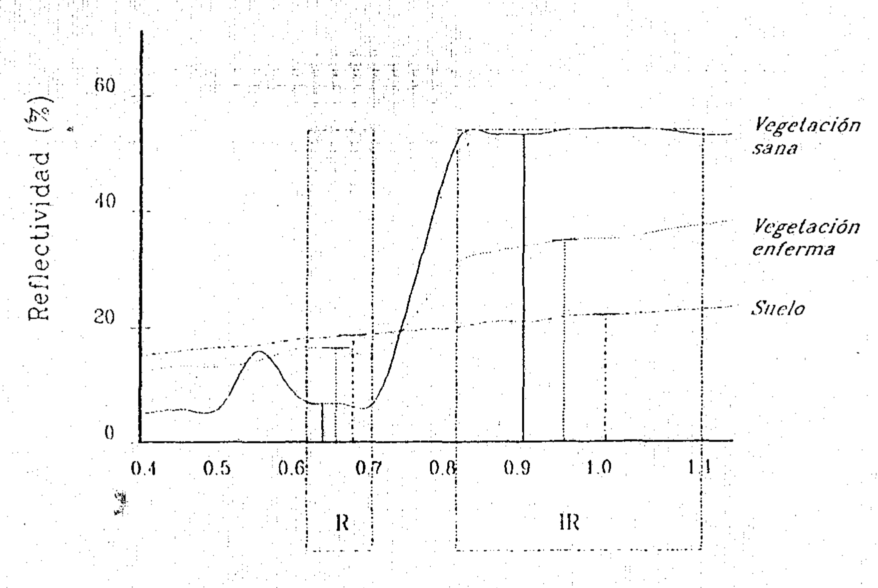


Fig. 6.41 - Fundamento espectral de los índices de vegetación

tre esas bandas, y el denominado índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*):

$$Coc_{i,j} = \frac{ND_{i,j,IR}}{ND_{i,j,R}} \qquad [6.33]$$

y

$$NDVI_{i,j} = \frac{(ND_{i,j,IR} - ND_{i,j,R})}{(ND_{i,j,IR} + ND_{i,j,R})} \qquad [6.34]$$

Con mayor rigor, ambos índices deberían definirse por valores de reflectividad en esas bandas, y no por los ND que componen la imagen. Se asume, por tanto, una previa corrección atmosférica (6.5.2.3) y conversión de ND a reflectividades (6.5.2.4). Algunos autores, no obstante, no tienen inconveniente en emplear directamente los ND de la imagen, siempre que no se pretenda conceder un valor físico a los resultados. En ese caso, el cociente o índice de vegetación presentará una valoración relativa, aunque sigue manteniéndose el principio anterior: cuanto mayor sea el resultado, mayor vigor vegetal presenta la zona observada.

El cociente entre las bandas infrarroja y roja se ha empleado profusamente en estudios de cartografía y control de la vegetación (Tucker, 1979). Para el caso del sensor MSS, ese cociente supone dividir las bandas 7 y 5; en el del TM, las bandas 4 y 3; para el HRV, la 3 y 2, y para el sensor AVHRR, los canales 2 y 1.

Respecto al NDVI, su empleo se ha impulsado recientemente para abordar estudios de pequeña escala, y principalmente para analizar cambios globales en la vegetación a partir del sensor AVHRR (Goward, 1989). Su principal ventaja, frente al cociente simple es su más fácil interpretabilidad, ya que está acotado entre ± 1, con un umbral crítico para cubiertas vegetales en torno a 0,2. Este tipo de estudios permiten conocer el estado de vigor vegetal sobre grandes espacios, detectando fenómenos de amplio rango de acción. Gracias a las características orbitales del satélite NOAA, este seguimiento puede realizarse casi en tiempo real, lo que permite abordar el control de episodios muy efímeros, así como la previsión de desastres. Fenómenos como el avance de la desertización en Africa (Justice et al, 1985), las pérdidas forestales en la Amazonia (Malingreau y Tucker, 1987), o el seguimiento de espacios vegetales en el continente americano (Goward et al, 1987), pueden ser eficazmente estudiados gracias a este tipo de índices. En nuestro país, el NVDI se ha empleado muy eficazmente para la previsión del riesgo de incendios forestales, a partir del seguimiento detallado del contenido de humedad en la vegetación (López et al, 1989).

En estudios de detalle, algunos autores han puesto en entredicho la validez del NDVI, al comprobarse que está notablemente influido por el tipo de suelo que subyace a la vegetación (Huete, 1987). Para paliar esta influencia, se propone introducir un parámetro corrector en la fórmula anterior. Así se obtiene el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI):

$$SAVI_{i,j} = \frac{(ND_{i,j,IR} - ND_{i,j,R})}{(ND_{i,j,IR} + ND_{i,j,R})} (1 + L) \qquad [6.35]$$

donde L, indica una constante para ajustar la línea vegetación-suelo al origen. En estudios experimentales sobre campos de hierba y algodón, se comprobó que este índice reducía sustancialmente las variaciones inducidas por el suelo en comparación con el NDVI y otros índices en la mayoría de las condiciones de la vegetación (Huete, 1987).

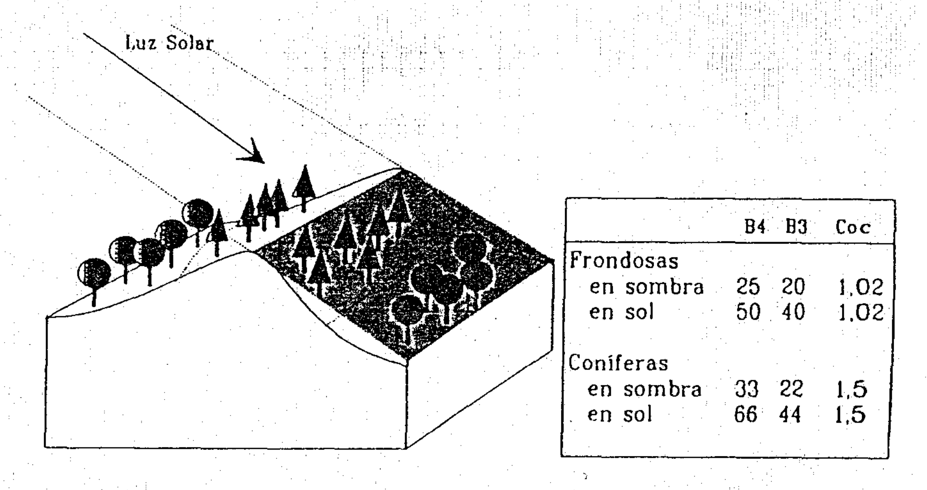
Además de los índices arriba indicados, se han realizado múltiples propuestas de índices alternativos, casi siempre basadas en las mismas

bandas (infrarrojo cercano y rojo). Sin embargo, varios autores han demostrado que estos índices son, en buena parte, equivalentes a los anteriores (Tucker, 1979; Perry y Lautenschlager, 1984; Yates et al, 1984), por lo que no parece oportuno detenernos en su comentario. En cualquier caso, resulta suficientemente demostrado que los índices de vegetación ofrecen una elevada correlación, de signo positivo, con algunos parámetros vitales de la vegetación, como son la biomasa total, los índices de verdor de la hoja, o los índices de superficie foliar (Curran, 1980; Jensen, 1983).

Un ejemplo de este tipo de transformaciones puede analizarse en la figura 6.42*, construida a partir del cociente entre las bandas 4 y 3 de la imagen de Madrid. El resultado se ha escalado propiamente para facilitar una mejor visualización. A partir de esta nueva imagen, se evidencian algunas cubiertas vegetales de difícil discriminación en las bandas originales, como es el caso de los campos de golf cercanos a la ciudad, y de las áreas ajardinadas en el interior del casco urbano. Asimismo, son patentes los cultivos regados, y la separación entre formaciones vegetales integradas por especies perennifolias y caducifolias, al igual que entre vegetación y suelos.

Junto a los índices de vegetación, se han propuesto otros cocientes de bandas para enfatizar distintos tipos de cubierta, especialmente en trabajos de exploración minera (Podwysocki et al, 1985). Este tipo de estudios sólo parecen viables en áreas de vegetación escasa, con objeto de obviar el efecto pantalla de la cubierta vegetal. En un trabajo realizado a partir de imágenes TM sobre el desierto del Mohave (California), se mostró el interés de los siguientes cocientes: TM5/TM7, para detectar rocas alteradas hidro-térmicamente, con alto contenido de arcillas, micas y rocas sulfatadas; TM5/TM4, para aislar las cubiertas vegetales del roquedo desnudo, y TM3/TM1, para aquellos materiales con importante presencia de limonita (Podwysocki et al, 1985).

En cuanto al empleo de los ratios de bandas para reducir el efecto del relieve en la caracterización espectral de cada cubierta, varios autores han mostrado el efecto homogeneizador de estas combinaciones aritméticas (Short, 1982; Solé, 1986). La reducción en la reflectividad que presenta una zona en sombra es proporcional en distintas bandas, por lo que un cociente tenderá a resaltar el contraste espectral frente al contraste de iluminación, más claro en las bandas originales. El ejemplo de la figura 6.43 puede servir para aclarar este punto. En las bandas 3 y 4, la superficie arbolada en solana presenta una reflectividad más alta que la medida en umbría. Si pretende discriminarse esta cubierta sobre



	B4	B3	Coc
Frondosas			
en sombra	25	20	1,02
en sol	50	40	1,02
Coníferas			
en sombra	33	22	1,5
en sol	66	44	1,5

Fig. 6.43 - Empleo del cociente de bandas para reducir el efecto de contraste topográfico

las dos bandas originales, la dispersión será muy elevada, puesto que aparecerá un notable contraste entre ambas vertientes debido a la iluminación. Sin embargo, el cociente de las dos bandas, tiende a reforzar el caracter espectral propio de esa cubierta frente a otras, independientemente de la vertiente en que se encuentre.

Sea una u otra la aplicación final del cociente o índice de vegetación, lo normal es que éste presente unos valores muy bajos. Convendrá, por tanto, escalar convenientemente el resultado, de tal forma que la imagen resultante esté en el rango 0 a 255, y pueda contrastarse visualmente el interés de la transformación.

Varias opciones permiten conseguir este objetivo. Una de las más empleadas comprende dos fases: en la primera se calcula el valor del cociente o índice de vegetación (IV) requerido, para todos los pixels de la imagen; en la segunda, se expande el rango de ese índice para que varíe entre 0 y 255. Esta expansión es similar a las ya comentadas en el marco de los realces de la imagen (6.6.1.4). Por ejemplo, una expansión lineal se abordaría como:

$$IV'_{i,j} = \frac{IV_{i,j} - IV_{min}}{IV_{max} - IV_{min}} \times 255 \quad [6.36]$$

donde $IV'_{i,j}$ simboliza el valor del índice de vegetación ya realzado, e $IV_{i,j}$ el original, para la misma posición en fila y columna.

Puesto que el cociente original varía entre 1/255 y 255, otra opción consiste en reservar la mitad del rango disponible (0 - 127) para los valores por debajo de 1, y el resto para los valores por encima de la unidad (Jensen, 1986). Basta aplicar:

$$IV'_{i,j} = [(IV_{i,j} \times 127) + 1] \quad si \quad IV_{i,j} \leq 1$$
y
$$IV'_{i,j} = [128 + (IV_{i,j} / 2)] \quad si \quad IV_{i,j} > 1 \qquad [6.37]$$

Otra aproximación, más rápida para el cálculo, puede obtenerse gracias al criterio propuesto por Hord (1982):

$$IV'_{i,j} = k \times \arctan IV_{i,j} \qquad [6.38]$$

El valor k es una constante adaptada al tipo de sensor y a las características de la escena. El autor sugiere un valor de 162,34 para imágenes MSS.

6.7.3 Componentes principales

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica bastante empleada en ciencias sociales y naturales. Su objetivo es resumir un grupo amplio de variables en un nuevo conjunto, más pequeño, sin perder una parte significativa de la información original.

El origen de esta técnica parece arrancar del campo de la sicometría: al analizar una serie de test de inteligencia, se intuía la presencia de una serie de factores, subyacentes a las variables medidas, que podrían explicar gran parte de la variación común en determinados grupos de variables. Por ejemplo, se comprobó que las puntuaciones obtenidas en física y matemáticas tendían a estar bastante relacionadas, así como las obtenidas por otros alumnos en historia y literatura. Esto hacía pensar en la existencia de otras variables más complejas, como la habilidad para el cálculo o la capacidad de abstracción, que permitirían resumir la información contenida en un mayor número de variables. Esos factores podrían cuantificarse a partir de las variables originales, estudiando sus relaciones comunes tal y como se miden en la matriz de varianza-covarianza. Los factores o componentes principales vendrían, por tanto, a ser como variables-síntesis de las medidas inicialmente: un menor

número de dimensiones, preservando lo más sustancioso de la información original.

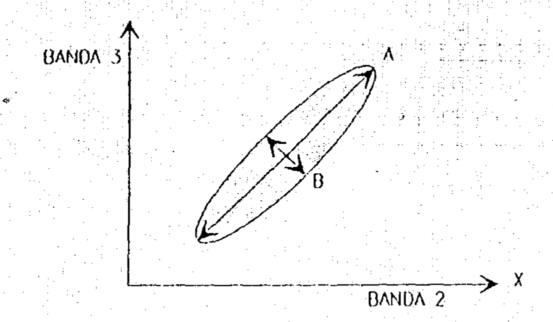
Esta capacidad de síntesis ha sido la base de la aplicación del ACP en teledetección. La adquisición de imágenes sobre bandas adyacentes del espectro, implica con frecuencia detectar una información redundante, puesto que los tipos de cubierta tienden a presentar un comportamiento similar en regiones próximas del espectro. Por ello, las medidas realizadas en una banda pueden presentar una importante correlación con las deducidas de otra, haciendo una o varias de ellas prácticamente irrelevantes. En este contexto, el ACP permite sintetizar las bandas originales, creando unas nuevas bandas -los componentes principales de la imagen-, que recojan la mayor parte de la información original. Esta síntesis resulta muy conveniente cuando se pretende abordar un análisis multi-temporal (Joly et al, 1983), o cuando se intentan seleccionar las tres bandas más adecuadas para una composición en color (Green et al, 1988).

Por otra parte, y desde el punto de vista meramente estadístico, el ACP facilita una primera interpretación sobre los ejes de variabilidad de la imagen: identificar aquellos rasgos que se recogen en la mayor parte de las bandas y aquellos otros que son específicos a algún grupo de ellas. Una mejor distribución de los datos, frente a esos ejes de variabilidad, puede facilitar una identificación más atinada de las distintas cubiertas.

Como es bien sabido, el sentido y la fuerza de la correlación lineal entre dos variables puede representarse gráficamente mediante un eje bivariado. En nuestro contexto, la nube de puntos indica la localización de los ND en las dos bandas consideradas. La elipse que limita estos puntos, expresa gráficamente la fuerza de la correlación entre las dos bandas, tanto mayor cuanto más se aproxime a una recta, o -dicho de otro modo- cuanto mayor sea el contraste entre los dos ejes de esa elipse. En la figura 6.44 aparece una correlación positiva elevada con dos ejes de variación: el primero en el sentido de la correlación (A), y el segundo, perpendicular a A, en el sentido de los residuales (B). Gráficamente se intuye, que una rotación de los ejes X,Y hacia las direcciones A, B, mejorará la disposición original de los datos, y probablemente también la separación entre los grupos de ND homogéneos en la imagen. Esa rotación se obtiene, simplemente, aplicando una función del tipo:

$$CP_1 = a_{11} ND_i + a_{12} ND_j$$

donde CP_1 indica el valor correspondiente al primer componente princi-



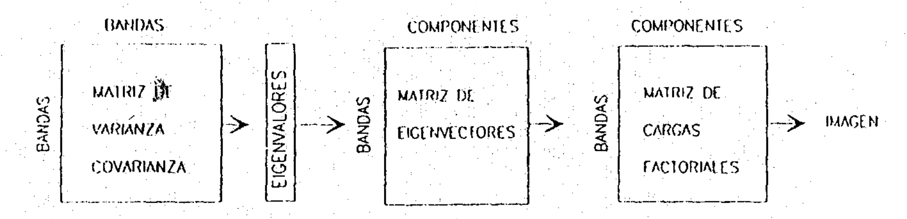


Fig. 6.44 - Proceso aplicado a la obtención de Componentes Principales

pal, obtenido a partir de los ND originales de las bandas i y j, tras aplicarles unos determinados coeficientes a_{11} y a_{12}. En forma similar, podría expresarse el desarrollo del segundo componente, ya que existen tantos CP como bandas originales. No obstante, en caso de cinco o seis bandas, sólo los primeros componentes son realmente signficativos, por cuanto en el proceso de extracción de los distintos CP se va maximizando, sucesivamente, la variación original acuñada por cada uno.

Desde el punto de vista geométrico, y como puede observarse en la figura 6.44, este nuevo eje sólo supone una rotación de los originales. En ocasiones, puede ser de gran interés acompañar la rotación con una traslación de los ejes, situando el origen de coordenadas en los valores mínimos de las dos bandas implicadas en el proceso. Basta, para ello, añadir dos constantes a_{01} y a_{02} a la ecuación arriba señalada.

Esta misma filosofía se aplica al trabajo con un mayor número de dimensiones. Lógicamente, la deducción de los nuevos ejes para 4 ó 7 variables no puede realizarse gráficamente, sino que es preciso aplicar una transformación matemática compleja, que encuentre los nuevos ejes

de variación que contengan la mayor parte de la información original de la imagen[3].

En términos sencillos, el proceso puede resumirse en los siguientes pasos. A patir de la matriz de varianza-covarianza, se extraen los eigenvalores para cada uno de los componentes (λ_p). Los eigenvalores expresan la longitud de cada uno de los nuevos componentes, y, en última instancia, la proporción de información original que retienen. Como antes se indicó, el ACP deduce tantos componentes como bandas originales, si bien el eigenvalor va disminuyendo progresivamente, del primero a los últimos, pues se pretende maximizar sucesivamente la varianza extraída en el análisis. La varianza original explicada por cada componente se calcula como la proporción de su eigenvalor frente a la suma de todos los eigenvalores:

$$V_p = \frac{\lambda_p \times 100}{\sum_{p=1}^{m} \lambda_p} \qquad [6.39]$$

siendo **m** el número total de componentes.

Junto a la longitud de cada eje, nos resulta también de gran interés conocer su dirección. En definitiva, para poder interpretar el sentido de las nuevas variables, se requiere conocer su relación con las originales. De igual forma, para calcular las ecuaciones que servirán para obtener las nuevas imágenes, se precisa contar con los coeficientes de la transformación. Ambos aspectos, pueden abordarse a partir de los eigenvectores. El eigenvector indica la ponderación que debe aplicarse a cada una de las bandas originales para obtener el nuevo CP. Dicho brevemente, equivale a los coeficientes de regresión en una transformación lineal estándar, siendo las bandas de la imagen las variables independientes, y los CP las dependientes.

A partir de los eigenvectores, puede calcularse la matriz de correlación entre CP y bandas de la imagen, lo que nos permite conocer el sentido espectral de estos componentes. Basta aplicar:

[3] Un buen grupo de manuales de estadística recogen el desarrollo pormenorizado de esta técnica (Mather, 1976; Snedecor y Cochran, 1980). En el contexto del tratamiento digital de imágenes, puede consultarse Short (1982, pp. 174 y ss), Gonzalez y Wintz (1977) y Thomas et al. (1986).

$$r_{p,k} = \frac{a_{p,k} \sqrt{\lambda_p}}{s_k} \qquad [6.40]$$

donde $r_{p,k}$ indica el coeficiente de correlación entre el componente p y la banda k; $a_{p,k}$, el eigenvector del componente p en la banda k; λ_p, el eigenvalor del componente p, y s_k, la desviación típica de la banda k.

El último paso es obtener una imagen de los componentes principales. Para ello, basta acudir a la matriz de eigenvectores ($a_{p,k}$), donde se mide la relación lineal de cada CP y las bandas originales. Al igual que otras transformaciones lineales, el cálculo de las nuevas bandas, o CP, se realiza de la forma siguiente:

$$CP_{i,j,p} = \sum_{k=1}^{n} a_{p,k} \times ND_{i,j,k} \qquad [6.41]$$

siendo n, el número de bandas; $CP_{i,j,p}$ el valor de la imagen del componente principal p para las coordenadas i, j; $a_{p,k}$, los eigenvectores para dicho componente en cada una de las k bandas, y $ND_{i,j,k}$, el ND de esa misma banda y para las mismas coordenadas.

Una vez obtenida la imagen de los CP, pueden estos representarse en blanco y negro o color, obteniéndose una nueva visualización de la zona de estudio. Para ello, convendrá escalar los resultados en el rango que permite el equipo de visualización (0 a 255). Una forma sencilla de abordar este proceso, sería realizar una pequeña muestra de los valores resultantes, con objeto de estimar los valores máximos y mínimos. Basta después aplicar una expansión lineal del siguiente tipo:

$$CP' = \frac{CP - CP_{min}}{CP_{max} - CP_{min}} \times 255 \qquad [6.42]$$

donde CP, CP', CP_{max} y CP_{min}, indican los valores correspondientes al CP de entrada, de salida, máximo y mínimo, respectivamente.

Para ilustrar esta técnica de análisis, se aplicó un ACP sobre la imagen de la ciudad de Madrid. A partir de una muestra sistemática de 100 líneas y 90 columnas (1 de cada 9 pixels), se obtuvo la matriz de varianza-covarianza para las siete bandas de la imagen (tabla 6.8)

Tabla 6.8
Matriz de varianza-covarianza de la imagen de Madrid

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
B1	327,18						
B2	241,87	169,24					
B3	347,53	251,84	399,01				
B4	180,96	145,69	240,51	267,41			
B5	395,84	304,24	523,05	391,75	1019,08		
B6	41,68	33,93	68,29	23,86	152,27	95,66	
B7	289,14	203,65	317,56	171,60	520,23	76,82	359,53

Sobre esa matriz se calcularon los eigenvalores de la imagen, realizando una previa estandarización, con objeto de paliar el efecto de la distinta variabilidad entre bandas. Los eigenvalores (λ_p) extraídos fueron: 2160,31; 262,32; 149,34; 63,41; 25,67; 19,15 y 1,91. De acuerdo a [6.39], la varianza original asociada con cada uno de estos componentes puede

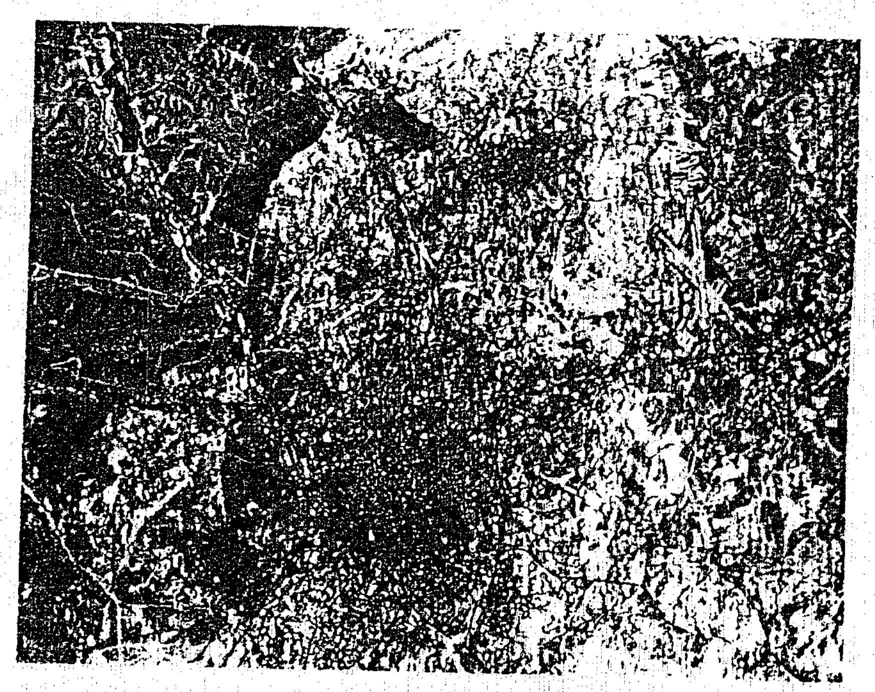


Fig. 6.45a - Primer Componente Principal de la imagen de Madrid

calcularse como: 80,54 % para el primer componente, 9,78 % para el segundo, 5,57 % para el tercero, 2,36 % para el cuarto, 0,96 % para el quinto, 0,71 % para el sexto y 0,071 % para el séptimo. De acuerdo a estos porcentajes, se seleccionaron únicamente los tres primeros componentes, que retenían un total del 95,89 % de la varianza original de la imagen.

El sentido espectral de estos componentes, se obtuvo a partir de la matriz de eigenvectores, en donde se evidencia la asociación entre cada componente y las bandas originales. Como puede analizarse en la tabla 6.9, el primer componente resultó un promedio ponderado de todas las bandas. Recogía, en consecuencia, una valoración de las características espectrales comunes a todas ellas, similar al componente Intensidad en la transformación HSI (6.6.4). El segundo componente aparecía con un significado más claro, pues presentaba una importante asociación positiva con la banda 5, y negativas con las tres visibles. Esto indicaba una valoración, aunque negativa, de las concentraciones de humedad, a las que el infrarrojo medio resulta especialmente sensible. Por último, el tercer componente, ofrecía un claro perfil de las cubiertas vegetales, con una importante asociación positiva en la banda 4 (infrarrojo cercano), y negativa en el infrarrojo medio y espectro visible.



Fig. 6.45b - Segundo Componente Principal de la imagen de Madrid

Tabla 6.9
Matriz de eigenvectores de la imagen de Madrid

	I	II	III
B1	0,348	-0,621	-0,067
B2	0,253	-0,327	-0.043
B3	0,407	-0,303	-0,093
B4	0,275	-0,109	0,793
B5	0,652	0,602	-0,056
B6	0,090	0,198	-0,374
B7	0,375	-0,047	-0,461

Las imágenes de los CP resultantes parecen demostrar esta interpretación teórica. El primero presenta una fisonomía muy similar a la de una imagen pancromática, con un valoración indiferenciada de la mayor parte de las cubiertas: bajos valores en el agua y la vegetación, medios en los espacios edificados, y altos en los suelos desnudos (fig. 6.45a).

El segundo remarca con claridad los espacios edificados, que ocupan el intervalo más bajo de la imagen, junto con el agua. Por el contrario, la vegetación manifiesta tonos gris-medio a claro, tanto más cuanto mayor sea el aporte del suelo que la sustenta: por ejemplo, las zonas centrales del Monte del Pardo, con cubierta forestal poco densa, aparecen más claras que los bordes, en donde el encinar gana en densidad y porte, cubriendo prácticamente el suelo. Asimismo, en el interior de Madrid, los tonos claros corresponden a las áreas cubiertas por cesped, como las pertenecientes al Canal de Isabel II o los campos de golf limítrofes a la ciudad, mientras los parques arbolados -caso del Retiro o el Parque del Oeste- ofrecen unos tonos más grisáceos (fig. 6.45b)

Por último, el tercer componente evidencia todos los sectores con una actividad clorofílica intensa, como son los cultivos en regadío, parques urbanos, o espacios de recreo (fig. 6.45c). Entre las áreas edificadas, se muestra un claro contraste entre aquellas que cuentan con una importante presencia vegetal: zonas residenciales de lujo, sectores del Norte de la ciudad, y los especios de edificación compacta. En cuanto a los suelos, este último componente discrimina mejor las variaciones internas, en función del tipo de vegetación presente en la zona.

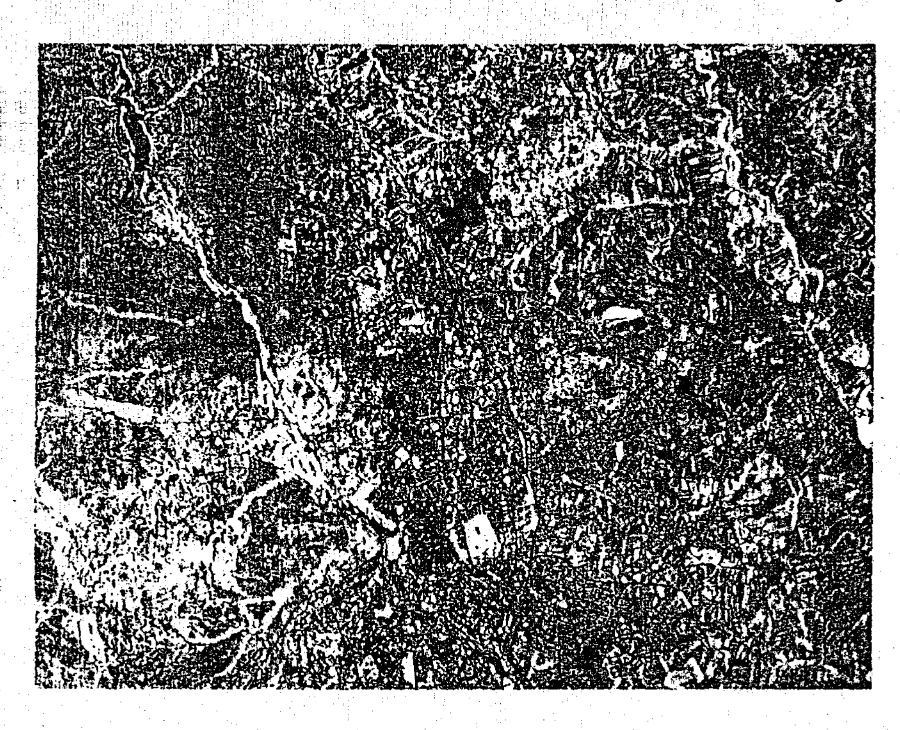


Fig. 6.45c - Tercer Componente Principal de la imagen de Madrid

La composición en color de los tres componentes resulta especialmente interesante para integrar estas dimensiones de variación (fig. 6.46*). Se ha elegido la combinación 2, 3 y 1 (*rojo, verde y azul*), para enfatizar la representación visual de la vegetación y los suelos desnudos. Aquella aparece en tonos verdes, con distintos grados en función de su contenido de humedad y densidad, mientras éstos se manifiestan en tonos rojizos, que se convierten en magenta cuando hay una cubierta vegetal poco densa. La ciudad ofrece tonos azules, tanto más oscuros cuanto menor cubierta vegetal presenta.

En otro contexto distinto al aquí comentado, el ACP resulta de gran interés para sintetizar la información de cara a los estudios multiestacionales. En este sentido, el proceso más habitual ha sido aplicar esta técnica a cada una de las imágenes, de distintas fechas, que intervienen en el estudio, con objeto de reducir el número de bandas significativas para la clasificación. Posteriormente, estos componentes se combinan, con objeto de derivar mapas de cambio, o facilitar una mejor discrimi-

nación de cubiertas con dinamismo temporal. Este tipo de planteamientos se siguieron en un trabajo de gran interés sobre l'Anse de l'Aguillon (Joly et al, 1983). A partir de cuatro imágenes MSS, adquiridas en distintas estaciones, los autores seleccionaron el primer componente de cada fecha, abordando posteriormente la clasificación sobre las cuatro fechas. En forma similar emplean esta técnica otros autores (Beer et al, 1978; Sicco, 1980; Meijerink y Donker, 1978; Schreier et al, 1982).

Otro enfoque de gran interés consiste en aplicar el ACP a la detección de cambios entre dos o más fechas de referencia. En este caso, el ACP se aborda sobre el conjunto de las bandas de varias fechas, una vez se han registrado propiamente. Puesto que la técnica permite deducir los ejes que albergan la mayor parte de la varianza, los primeros componentes son los menos interesantes para deducir cambios, puesto que expresan características comunes a las diversas fechas. Por el contrario, los componentes intermedios, muestran aspectos particulares de cada una de ellas, que no varían en el conjunto (Byrne et al, 1980).

Pese al interés de este tipo de estudios, el ACP no resulta todavía muy popular entre los científicos del medio ambiente debido al tiempo de ordenador que requiere y a la destrucción de las relaciones entre radiancia del objeto y valor digital (Curran, 1985). Por cuanto la transformación es dependiente de la escena, no pueden aplicarse reglas generales para la interpretación de los CP, aunque algunos autores han mostrado el interés de esta técnica para realzar el análisis visual de composiciones coloreadas (Chavez y Kwarteng, 1989).

6.7.4. Transformación 'Tasseled Cap' (TTC)

Al igual que el ACP, esta transformación se dirige a obtener unas nuevas bandas, por combinación lineal de las originales, con objeto de realzar algunos rasgos de interés en la escena. La diferencia frente al ACP estriba en que la TTC ofrece unos componentes de significado físico preciso, esto es independientes del tipo de imagen que se esté analizando.

La TTC fue ideada por Kauth y Thomas en el marco del proyecto LACIE (*Large Area Crop Inventory Experiment*), desarrollado por la NASA y el Departamento de Agricultura norteamericano (USDA) para la predicción de cosechas. Dentro de este proyecto, estos autores pretendieron modelar los componentes fundamentales de variación en una imagen MSS, describiendo sus características físicas desde el punto de

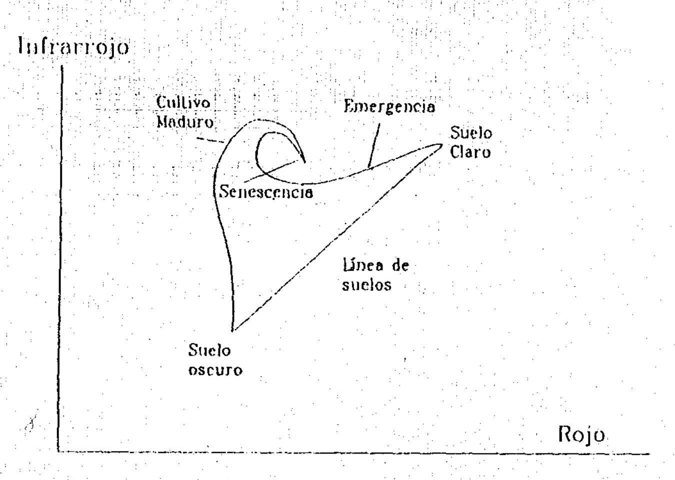


Fig. 6.47 - Fundamento de la transformación *Tasseled Cap*

vista del estudio de cultivos (Kauth y Thomas, 1976). A partir de una serie de imágenes de zonas agrícolas, se trató de sintetizar los ejes de variación espectral de los cultivos en una figura tri-dimensional, de aspecto parecido a un gorro con borlas (*tasseled cap*). Considerando las bandas roja e infrarrojo, la base de ese gorro se define por la línea de suelos, en donde se sitúan los distintos tipos de suelo, de acuerdo a su color (fig. 6.47). Según el cultivo va ganando en vigor, tiende a aproximarse al eje de la banda infrarroja, convergiendo en un punto cuando se produce la máxima madurez. A partir de ahí el cultivo tiende a marchitarse, retornando hacia la línea de suelos.

La TTC tiende a poner más en evidencia este comportamiento espectral, a partir de crear nuevos ejes mejor ajustados a ese espacio físico. En ese nuevo sistema de coordenadas, se pretendía que fuera más nítida la separación entre suelos y vegetación. Para el caso de las imágenes MSS, sobre las que se desarrolló esta transformación, los nuevos ejes se obtuvieron a partir de:

$$u_j = R'_i \, x_i + c \qquad [6.43]$$

donde u_j indicaba el vector correspondiente a la imagen transformada; x_i, el vector de entrada; R'_i, el vector de coeficientes de transformación, y c una constante para evitar valores negativos. Los autores sugerían un valor c = 32.

Tabla 6.10
Coeficientes propuestos para la obtención de la TTC
(Crist y Cicone, 1984c)

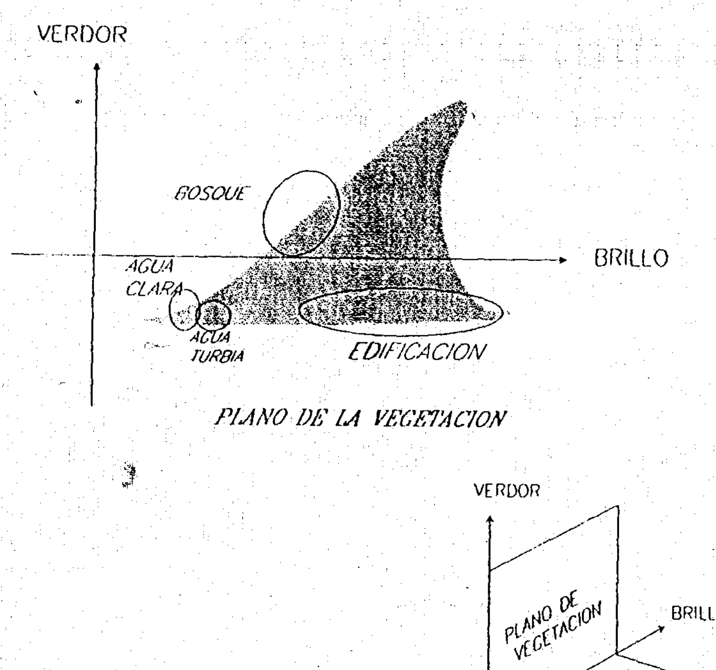
Componente	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
BRILLO	0.3037	0.2793	0.4743	0.5585	0.5082	0.1863
VERDOR	-0.2848	-0.2435	-0.5436	0.7243	0.0840	-0.1800
HUMEDAD	0.1509	0.1973	0.3279	0.3406	-0.7112	-0.4572

Sobre el conjunto de imágenes de su muestra, los autores del trabajo distinguían tres componentes: uno denominado brillo (*brightness*), suma ponderada de las cuatro bandas originales; otro, denominado verdor (*greenness*), relacionado con la actividad vegetativa; un tercero conocido como marchitez (*yellowness*), que pretendía relacionarse con la reducción en el vigor vegetal, y un último sin significado aparente (*nonsuch*).

En un primer momento, esta transformación no tuvo mucho eco en la literatura científica, frente a los índices y transformaciones convencionales. En los últimos años, sin embargo, se viene empleando con mayor profusión. Crist y Cicone han realizado diversos trabajos a partir de la TTC, mostrando su aplicabilidad a otros sensores, principalmente al TM y AVHRR (Crist y Cicone, 1984a, 1984b; Cicone y Metzler, 1984). Para el caso del sensor TM, la tabla 6.10 recoge los coeficientes propuestos por Crist y Cicone (1984c) para derivar los tres principales ejes de la TTC.

Una de las ventajas de esta transformación frente al ACP radica en su interpretabilidad física. En efecto, los componentes deducidos a partir de la TTC tienen un significado preciso, independiente de las condiciones de la escena, puesto que se basan sobre las características de las bandas espectrales en consideración. Por tanto, los coeficientes propuestos pueden aplicarse a distintas imágenes del mismo sensor, con las salvedades propias de considerar que fueron extraídos a partir de los rasgos agrícolas del *Mid-West* americano. Otro factor a tener en cuenta sería el referente al escalado de la imagen resultante, que varía notablemente según la fecha del año y las condiciones de iluminación. Puede emplearse, a este respecto, alguno de los procedimientos aplicados anteriormente para cocientes e índices de vegetación.

La TTC cuenta ya con un importante rango de aplicaciones (Crist y Cicone, 1984b; Cicone y Metzler, 1984; Perry y Lautenschlager, 1984;



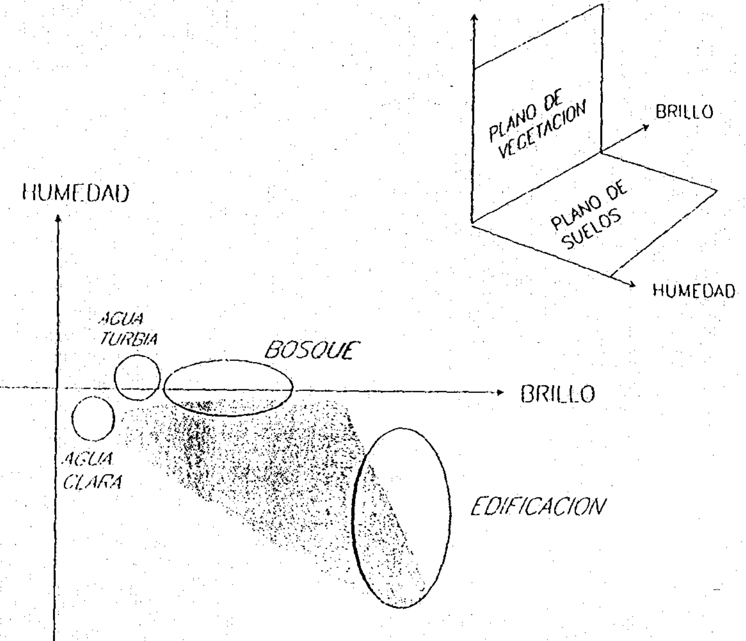


Fig. 6.48 - Planos de variación en una transformación TC

García et al, 1986). En trabajos comparativos sobre la aplicación de la TTC a imágenes MSS y TM, se ha puesto de manifiesto la presencia -en el caso de este último sensor- de un nuevo componente, denominado Humedad (*Wetness*), estrechamente relacionado con la información que el TM proporciona del infrarrojo medio y que resulta original frente al sensor MSS. En consecuencia, una imagen TM presenta tres ejes principales de variación:

(i) Brillo (*Brightness*), que refleja los cambios en la reflectividad total de la escena. Como puede apreciarse en la tabla 6.10, se trata de una suma ponderada de todos los canales, excluido el térmico.

(ii) Verdor (*Greenness*), que indica el contraste entre las bandas visibles y el infrarrojo próximo. Destaca la intervención de la banda 4, la ponderación negativa de las visibles y la anulación mutua de las dos en el infrarrojo-medio.

(iii) Humedad (*Wetness*), que se relaciona con el contenido de humedad en la vegetación y en el suelo. Está nítidamente vinculada con el infrarrojo medio, en donde se manifiesta con mayor claridad la absorción del agua.

La combinación de estos ejes, permite distinguir varios planos de variación (fig. 6.48), de gran interés para el estudio detallado de suelos y vegetación. A partir de estos ejes, suelen distinguirse tres planos: el de vegetación, formado por el eje de brillo y de verdor, el de suelos, formado por el brillo y la humedad, y el de transición, formado por la humedad y el verdor (Crist y Cicone, 1984c).

De acuerdo a los coeficientes propuestos por Crist y Cicone (tabla 6.10), se ensayó la aplicación de la TTC sobre la imagen de Madrid. Esto permitió obtener tres nuevas imágenes, por combinación lineal de los seis canales no térmicos del TM (fig. 6.49). El primero de los componentes deducidos, el conocido como Brillo, aparece como una imagen pancromá-tica, por cuanto se trata de una combinación ponderada de las diferentes bandas. En este sentido, aparece muy similar a la imagen del componente principal I.

El componente de Verdor, refleja con gran claridad los dominios vegetales presentes en la imagen. Destaca el contraste entre los espacios edificados y suelos desnudos frente a cualquier cubierta vegetal, tanto arbolada como no. Por ejemplo, los pastizales del Oeste de la ciudad, poco vigorosos, ofrecen una tonalidad muy clara, no muy distante de los



Fig. 6.49a - Componente *Brightness* de la imagen de Madrid

cultivos o las praderas regadas. Los tonos más oscuros aparecen en suelos despejados, áreas edificadas y vías de comunicación.

Por último, el componente de Humedad resulta muy original, en el contexto de las operaciones comentadas en este capítulo, por cuanto ofrece una información no recogida en otras transformaciones. Se manifiestan claramente los cursos y láminas de agua, así como aquellos sectores de la ciudad que tienden a estar más húmedos en esta época veraniega: zonas cubiertas de vegetación o de entramado abierto. Los tonos más oscuros se presentan en los suelos desnudos o cubiertos por rastrojeras ya cosechados.

La composición coloreada de los tres componentes resulta también muy expresiva (fig. 6.50*). Con tonos cian se recogen las zonas cubiertas por vegetación, tanto más anaranjadas cuanto menor cubierta forestal (caso del Monte del Pardo), con la excepción de la sometida a riego. La ciudad ofrece tonos rojizos y azulados, los primeros correspondientes a áreas donde predominan más los espacios abiertos, mientras los segundos a espacios donde la vegetación está más presente. Los suelos desnudos o

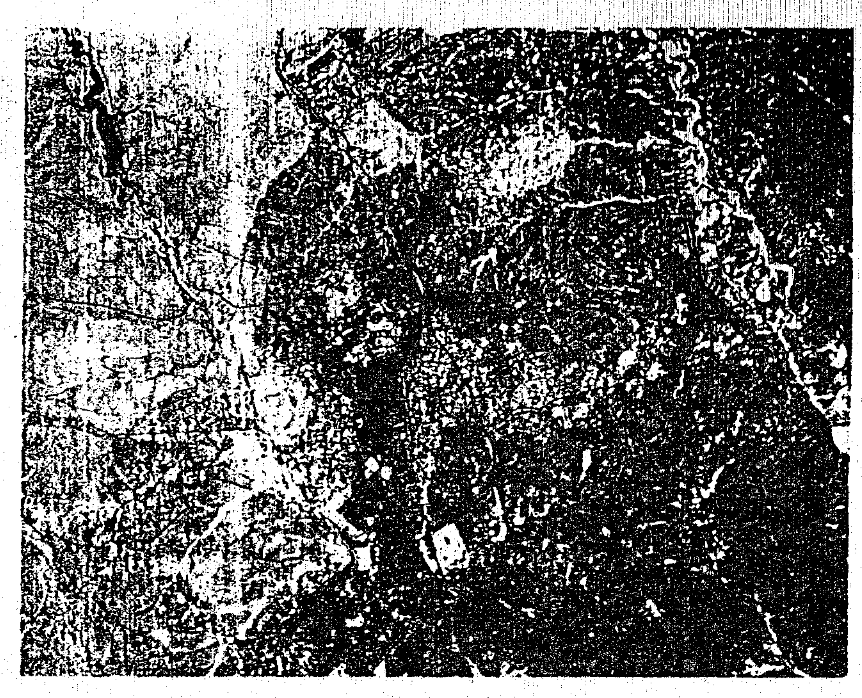


Fig. 6.49b - Componente *Greeness* de la imagen de Madrid

con rastrojo, por su parte, presentan tonos rojizos, que se convierten en azules en presencia de matorral de bajo porte.

A partir de ésta, y las demás transformaciones que hemos estudiado en el presente capítulo, pueden abordarse tareas de análisis visual o de clasificación digital, en función del objetivo temático marcado en el estudio. En cualquier caso, son muy útiles para adquirir una mejor comprensión de las características de la imagen, del sentido espectral de la información que proporciona, y de sus principales ejes de variabilidad.

6.8. CLASIFICACIÓN DIGITAL

6.8.1. Conceptos previos

Para la mayor parte de los usuarios de la teledetección, la clasificación supone la fase culminante del tratamiento digital de imágenes. Hacia ella se orientan, casi siempre, las operaciones hasta aquí estudiadas,

Fig. 6.49c - Componente *Wetness* de la imagen de Madrid

puesto que los resultados de la clasificación marcan la calidad final del proyecto desarrollado.

Este papel protagonista viene dado por la misma naturaleza de la teledetección espacial. Los ND adquiridos por el sensor no tienen sentido en sí mismos, sino en cuanto son interpretables; esto es, convertibles a categorías que supongan un mejor conocimiento del territorio. Esta interpretación puede hacerse visualmente, sobre reproducciones fotográficas de las imágenes, o digitalmente, empleando la potencia y rapidez de cálculo que proporciona un ordenador electrónico. Como fruto de la clasificación digital se obtiene una cartografía e inventario de las categorías objeto de estudio. La información multi-espectral se condensa, en definitiva, en un documento cartográfico y en unas tablas estadísticas, que definen la localización y ofrecen el inventario superficial de las categorías de interés (fig. 6.51).

Cabe también abordar un proyecto basado exclusivamente sobre los ND de la imagen. En este caso, el objetivo sería establecer una relación

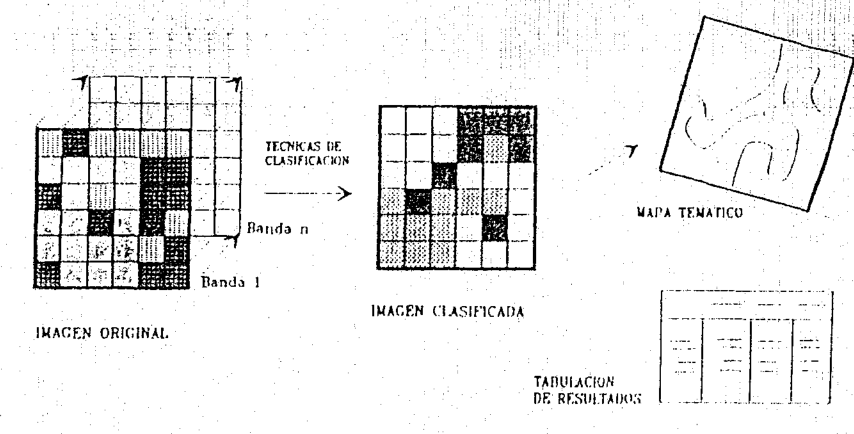


Fig. 6.51 - Fundamentos de la clasificación digital

cuantitativa entre determinados parámetros físicos -como son contenido de biomasa, estrés de la vegetación, humedad del suelo, etc.- y los ND que adquirió el sensor. Se trata ésta de una línea de trabajo todavía poco desarrollada, debido a la gran complejidad para modelar los diversos factores que intervienen en la adquisición de la imagen: tipo de cubierta, densidad, situación, grado de mezcla con otras especies, condiciones atmosféricas, geometría de adquisición, etc. Estos factores dificultan notablemente el establecimiento de modelos cuantitativos, por cuanto resulta muy complejo convertir en parámetros físicos los ND finalmente incluidos en la imagen (6.5.2.4). En este sentido, no cabe aún hablar de una teledetección biofísica (Jensen, 1983), en donde las medidas del sensor puedan usarse en términos absolutos.

La alternativa pasa por considerar los ND de la imagen como medidas relativas. Quiere esto decir que, aunque no puedan traducirse propiamente a magnitudes físicas, sí indican una valoración ordinal entre los pixels que componen una imagen determinada. En otras palabras, si bien no puede conocerse con rigor el valor de reflectividad que corresponde a cada ND, sí podemos afirmar que cuanto mayor sea su ND, mayor será la reflectividad de la parcela del terreno a la que corresponde ese pixel. Evidentemente, estas comparaciones pueden realizarse para cada banda, y no entre ellas, ya que los coeficientes de calibración del sensor y las influencias atmosféricas no son equiparables entre bandas (6.5.2.3). En similares términos cabe expresarse en lo que se refiere a las comparaciones entre imágenes de la misma zona, pero adquiridas en distinta

fecha, o para imágenes de distintas zonas, por cuanto estarán influidas por peculiares condiciones atmosféricas y medio ambientales.

En consecuencia, la clasificación digital no busca una definición absoluta de cada cubierta, que pudiera ser aplicable a cualquier imagen, sino más bien una caracterización particular, válida para una determinada imagen y un territorio concreto (Robinove, 1981). Con este planteamiento, no resulta preciso conocer detalladamente las condiciones de adquisición: basta identificar en la imagen las cubiertas de interés, sin pretender que esa identificación sea extrapolable a otras situaciones. En resumen, no se trata de establecer un modelo entre medidas digitales y parámetros físicos, sino entre medidas digitales, en un momento dado, y tipos de cubierta. En este sentido, la clasificación supone un enfoque más cualitativo, si bien, por tratarse de un proceso numérico, incorpora un aparato estadístico ciertamente importante.

Volviendo al objetivo del presente capítulo, la clasificación digital se dirige a obtener una nueva imagen, en la cual cada uno de los pixels originales venga definido por un ND, que es el identificador de la clase en donde se haya incluido. Estas clases pueden describir distintos tipos de cubierta (variable nominal o categórica), o bien intervalos de una misma categoría de interés (variable ordinal). Por ejemplo, una clasificación de especies vegetales estaría dentro del primer grupo, mientras un intento de señalar niveles de afectación en un incendio forestal o de humedad en una inundación, estaría en el segundo.

Sea uno u otro el propósito del proyecto, la clasificación digital sigue cauces análogos a los que se emplean en foto-interpretación. En esta técnica, en primer lugar el intérprete identifica cada cubierta, de acuerdo a una serie de criterios: tono, textura, forma, disposición, etc., tal y como aparecen en unos fotogramas tipo. Posteriormente, delimita sobre el resto de las fotografías las zonas que se corresponden con ese patrón previamente definido. En otras palabras, asigna a cada categoría unas determinadas superficies, en función de la semejanza de éstas con el patrón-tipo identificado previamente. Por último, verifica sobre el terreno la interpretación realizada.

Este es también el esquema de la clasificación digital. Basta traducir los criterios analógicos por digitales, por cuanto se realiza sobre los ND presentes en la imagen. De esta forma, pueden distinguirse las siguientes fases: (i) definición digital de las categorías (fase de entrenamiento), (ii) distribución de los pixels de la imagen en una de esas categorías (fase de asignación), y (iii) comprobación y verificación de resultados.

Trataremos aquí de las dos primeras, reservando la tercera para un capítulo independiente, puesto que las técnicas de verificación son aplicables tanto al tratamiento digital como al análisis visual.

6.8.2. Fase de entrenamiento

6.8.2.1. Conceptos básicos

Para que una fotografía aérea pueda ser interpretada en detalle es preciso que exista una experiencia previa, que nos permita identificar cada una de las categorías de interés por una serie de rasgos, como son tono, textura, situación o tamaño. Es posible distinguir entre matorral y arbolado, gracias a que éste tiene una textura más rugosa; mientras la separación entre agua y cultivos herbáceos de secano se realiza sobre la diferencia de tonalidad. De la misma forma, la clasificación digital se inicia definiendo cada una de las categorías que pretenden discriminarse. Por cuanto se trata de una clasificación numérica, esta definición también debe ser numérica; esto es, se trata de obtener el ND, o mejor aún el rango de ND, que identifica a cada categoría, para todas las bandas que intervienen en la clasificación.

Como ya hemos visto a lo largo de esta obra, diversos factores introducen una cierta dispersión en torno al comportamiento espectral medio de cada cubierta. Esto implica que las distintas categorías no se definen por un sólo ND, sino por una serie de ND, más o menos próximos entre sí. En términos de su clasificación digital, esto supone que existe una cierta dispersión en torno al ND que define cada categoría, más o menos significativa según las clases que se consideren y la propia complejidad del paisaje donde éstas se asienten. Por ello, la fase de entrenamiento resulta ciertamente compleja: se trata de definir con rigor cada una de las categorías que pretenden discriminarse, teniendo en cuenta su propia variabilidad en la zona de estudio.

Este objetivo se logra seleccionando una muestra de pixels de la imagen, que representen, adecuadamente, a las categorías de interés. A partir de esos pixels pueden calcularse los ND medios y la variabilidad numérica de cada categoría, en todas las bandas que intervienen en la clasificación. Al igual que en cualquier otro muestreo, el objetivo de esta fase es obtener los resultados más precisos con el mínimo coste. En otras palabras, identificar debidamente las distintas categorías, reduciendo a lo imprescindible los trabajos de campo. Al igual que en otras aplicaciones del muestreo, las estimaciones posteriores se basan sobre la muestra

seleccionada, por lo que una incorrecta selección de ésta conducirá inexorablemente a pobres resultados en la clasificación posterior. Varios autores han comprobado que los resultados de la clasificación, están mucho más influidos por la definición previa de las categorías, que por el criterio con el que éstas son posteriormente discriminadas (Hixson et al, 1980; Story y Campbell, 1986). En definitiva, la fase de entrenamiento constituye la columna vertebral de la clasificación numérica.

Tradicionalmente se han dividido los métodos de clasificación en dos grupos: supervisado y no supervisado, de acuerdo a la forma en que son obtenidas las estadísticas de entrenamiento. El método supervisado parte de un conocimiento previo del terreno, a partir del cual se seleccionan las muestras para cada una de las categorías. Por su parte, el método no supervisado procede a una búsqueda automática de grupos de valores homogéneos dentro de la imagen. Queda al usuario, en este caso, la labor de encontrar correspondencias entre esos grupos y sus categorías de interés. Volviendo al paralelismo con la fotografía aérea, podríamos afirmar que, en ésta, el método supervisado es el más habitual, por cuanto se identifican sobre unos fotogramas-tipo las características de cada clase, para luego delimitar, en el resto, las zonas que se ajustan a esas características. El método no supervisado supondría, en primer lugar, identificar sobre la fotografía aérea zonas homogéneas en cuanto a tonos, textura, disposición, etc., para luego asignarlas a una de las clases temáticas establecidas en la leyenda.

Para iluminar el sentido de ambos métodos, en el contexto de la clasificación digital, puede ser conveniente introducir una pequeña reflexión sobre el tipo de categorías que pueden intervenir en una clasificación temática. Suelen distinguirse, a este respecto, dos tipos de clases: informacionales y espectrales (Labrandero, 1978; Chuvieco, 1986). Las primeras son las que constituyen la leyenda de trabajo que pretende deducir el intérprete (tipos de ocupación del suelo, por ejemplo). Las segundas, corresponden a los grupos de valores espectrales homogéneos dentro de la imagen, en función de ofrecer una reflectividad similar, para las bandas consideradas y en la fecha concreta de la imagen. Las categorías informacionales se establecen por el usuario, mientras las espectrales se deducen de los ND presentes en la imagen.

Idealmente habría de producirse una correspondencia biunívoca entre las dos (fig. 6.52); esto es, que a cada clase de cobertura le corresponda un único grupo espectral, y que cada grupo espectral corresponda a una sóla clase temática. Desgraciadamente este caso es muy poco frecuente, produciéndose, normalmente, alguna de las siguientes situaciones:

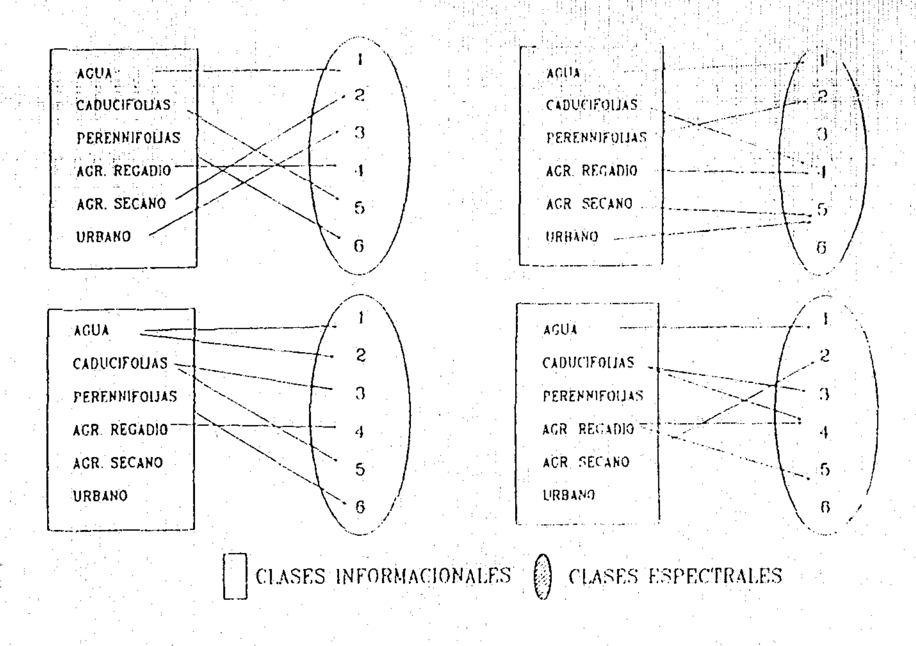


Fig. 6.52 - Relaciones entre clases informaciones y espectrales

(i) Que una categoría de cubierta esté expresada en varias clases espectrales. Por ejemplo, el pinar según su emplazamiento podría aparecer en dos grupos: uno correspondiente a solana y otro a umbría; o el agua en distintos tipos, de acuerdo a su profundidad o turbidez. En estos casos, basta perfeccionar el muestreo, de tal forma que se defina correctamente la dispersión espectral de cada clase. Si los grupos espectrales a que corresponden son muy variados, puede dividirse una categoría informacional en varias subclases, para luego fundirlas -tras la clasificación- en una sóla especie temática. Esto evita contar con clases muy heterogéneas espectralmente, y, por tanto, fácilmente sujetas a confusión con otras vecinas.

(ii) Otra caso sería que dos o más categorías informacionales compartan una sola clase espectral. Esto implicaría que algunas categorías de la leyenda no son discriminables, a partir de la imagen con que se cuenta, sin grave peligro de confusión. En este caso, la opción más razonable sería optar por una clave más general, evitando descender a un nivel de desagregación no abordable a partir de esos datos. Por ejemplo, podría optarse por una clase denominada coníferas, en lugar de distinguir distintos tipos de pinar, o urbana, frente a distintas densidades de

edificación. En caso de que las confusiones se den entre categorías no asimilables a una clave más genérica (por ejemplo, entre núcleos rurales y rastrojera, en imágenes de verano), habría que analizar una imagen perteneciente a otra fecha del año en donde esa confusión sea evitable (mayo, en el ejemplo anterior). Lógicamente, también pueden intentarse otros medios, como refinar el método de muestreo, o añadir alguna variable auxiliar (relieve, suelos, etc.).

(iii) Por último, puede también ocurrir que varias clases informacionales compartan clases espectrales. En este caso convendría replantear la estrategia de trabajo, aunque soluciones parciales pueden estimarse a partir de los párrafos anteriores.

A la luz de este comentario, parece claro que el método supervisado pretende definir clases informacionales, mientras el no supervisado tiende a identificar las clases espectrales presentes en la imagen. De los párrafos anteriores, también puede deducirse que ninguno de los dos métodos proporciona una solución inmediata a todos los problemas que entraña una clasificación digital. Por un lado, el método supervisado puede tacharse de subjetivo y artificial, pues puede 'forzarse' al ordenador a discriminar categorías que no tengan una claro significado espectral. Por otro, el método no supervisado proporciona en ocasiones resultados de difícil interpretación, poco conectados con las necesidades del usuario final del producto. Asimismo, resulta poco claro que este método sea realmente capaz de identificar las agrupaciones naturales de la imagen. De ahí la diversidad de algoritmos y de parámetros de control revisados en la literatura, como más tarde tendremos ocasión de analizar.

En resumen, la elección entre uno y otro método dependerá de los datos y medios disponibles y de las propias preferencias personales (Marx y Hildebrandt, 1978; Townshend y Justice, 1981).

6.8.2.2. Método supervisado

El método supervisado parte de un cierto conocimiento de la zona de estudio, adquirido por experiencia previa o por trabajos de campo. Esta mayor familiaridad con la zona test, permite al intérprete delimitar sobre la imagen unas áreas piloto, que se consideran suficientemente representativas de las categorías que componen la leyenda. Estas áreas se denominan, en la bibliografía anglosajona, *training fields* (campos de entrenamiento). El término indica que tales áreas sirven para 'entrenar' al ordenador en el reconocimiento de las distintas categorías. En otras palabras, a partir de ellas el ordenador calcula los ND que definen cada una de las clases, para luego asignar el resto de los pixels de la imagen a una de esas categorías en función de sus ND.

La mayor parte de los equipos de tratamiento digital permiten localizar interactivamente los campos de entrenamiento. Con ayuda del digitizador o ratón electrónico, el usuario introduce sobre la pantalla los vértices que definen cada uno de estas áreas, asignándolas a una de las categorías definidas previamente en la leyenda. Los trabajos de campo y otros documentos auxiliares -como la fotografía aérea o la cartografía convencional- pueden ser de gran ayuda para una localización más precisa de estas áreas, teniendo en la mente que debe tratarse de ejemplos suficientemente representativos y homogéneos de la clase que pretende definirse. Acabada la delimitación de un campo de entrenamiento, pueden seleccionarse otros para la misma categoría, o bien culminar con él la definición de esa clase. En general, resulta conveniente seleccionar varios campos por categoría, a fin de reflejar adecuadamente su variabilidad en la zona de estudio.

Finalizada la selección de las áreas de entrenamiento, el ordenador calcula las estadísticas elementales de cada categoría: media, rango, desviación típica, matriz de varianza-covarianza, etc., a partir de los ND de todos los pixels incluidos en los campos de entrenamiento asignados a esa clase. Lógicamente, este cálculo se aplica a todas las bandas que intervendrán en la clasificación. En definitiva, se asume que las áreas de entrenamiento son fiel representantes de las distintas categorías, y que, por tanto, las medidas extraídas a partir de sus ND definen convenientemente a esas clases. De aquí que sea crucial la correcta selección de los campos de entrenamiento. De otra forma, la clasificación estaría viciada de partida, al pretender discriminar categorías con escaso significado espectral.

Un sencillo ejemplo puede servir para ilustrar el proceso de selección de los campos de entrenamiento. Se trata de una imagen en la que aparecen sólo tres cubiertas: viñedo, encinar y cereal. Una primera opción sería localizar un campo de entrenamiento por categoría (fig. 6.53a), con el suficiente detalle para evitar confusiones con otras cubiertas. A partir de los vértices trazados previamente, el ordenador contabiliza los ND de todos los pixels incluidos en cada campo, y obtiene la media y desviación típica de las categorías que tratan de definir.

Ahora bien, la selección de áreas de entrenamiento sería incorrecta si alguna se sitúa en zonas de transición entre cubiertas (fig. 6.53b). Al tratarse de un área heterogénea, sus medidas estadísticas serían un cierto

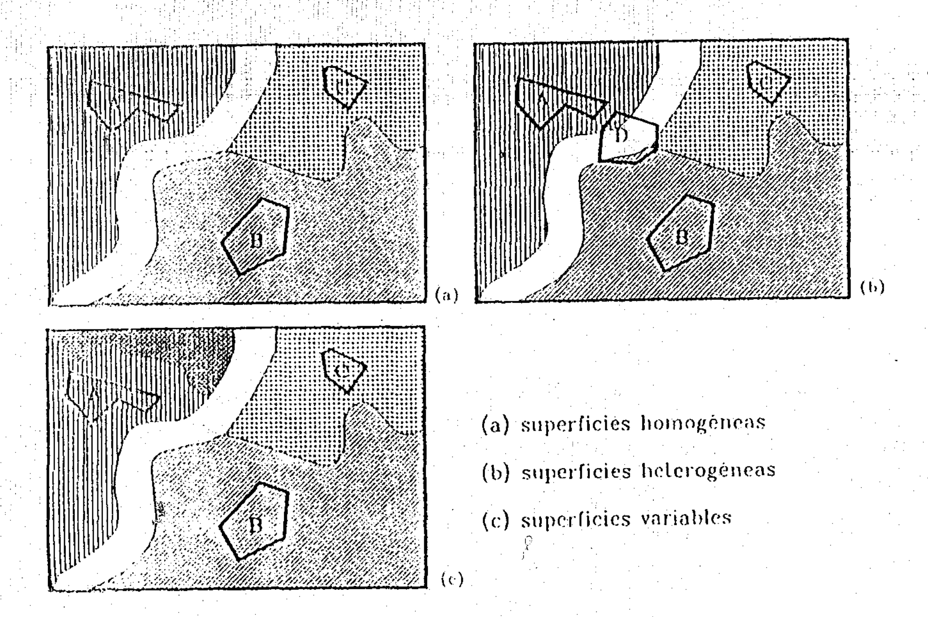


Fig. 6.53 - Problemas en la selección de los campos de entrenamiento

promedio de los distintos componentes. Se trataría de una clase híbrida y, en consecuencia, susceptible de confusión con otras categorías.

El error contrario sería seleccionar únicamente áreas de entrenamiento en aquellos parajes donde la categoría sea muy homogénea, obviando la variación real que esa cubierta recoge en la imagen (fig. 6.53c). Por ejemplo, si se pretende clasificar el encinar, conviene seleccionar campos tanto donde el encinar aparece más denso, como en aquellas zonas en donde cubre menos el suelo, o donde se asocia con el matorral. No quiere esto decir que ambos tipos de encinar deban incluirse en la misma categoría de cara a la clasificación, puesto que podría originarse una clase poco coherente. Parece más recomendable establecer dos o más categorías (con distintos tipos de densidad), para luego proceder, tras la clasificación, a unirlas en una sola clase temática. De estas frases se deduce que el método supervisado requiere un previo conocimiento de las características del área de estudio, así como de las categorías que pretenden discriminarse.

Un último aspecto a considerar en la selección de los campos de entrenamiento, se refiere a los requisitos estadísticos que garantizan su

grado de representatividad de las distintas categorías. Como antes se comentó, este proceso es una forma peculiar de muestreo espacial. Por ello, conviene tener en cuenta algunos criterios habituales en este tipo de técnicas para elegir el tamaño y la distribución más idónea de la muestra, así como para realizar estimaciones a partir de ella.

En cuanto al tamaño, se requiere seleccionar un mínimo de **m**+1 pixels por categoría, siendo **m** el número de bandas que integran el análisis (Schowengerdt, 1983). Conviene, no obstante, superar con creces este límite mínimo. Diversos autores recomiendan seleccionar un número de pixels comprendido entre 10m y 100m por categoría (Jensen, 1986; Mather, 1987). Este número mínimo se relaciona estrechamente con el grado de asociación espacial entre pixels. El muestreo convencional considera que las muestras seleccionadas son aleatorias e independientes. Esta asunción no es válida en nuestro caso, por cuanto un campo de entrenamiento alberga a pixels vecinos, afectados por el fenómeno de la auto-correlación espacial. En pocas palabras, esta asociación, comprobada en diversos trabajos (Congalton, 1988a), supone que la información original extraída de un número de pixels contiguos, es menor que si fue extraída de otros dispersos. En suma, resulta más conveniente elegir varios campos de pequeño tamaño, que uno sólo de mayores dimensiones, ya que tenderá a infravalorarse la variabilidad de esa categoría. También se puede optar por seleccionar pixels aleatoriamente, dentro de campos de mayor tamaño, en lugar de admitirlos todos (Campbell, 1981 y 1987).

Respecto a la distribución, conviene tener en cuenta las propias características de la imagen, intentando abarcar las variaciones espaciales que se presentan en cada categoría: su orientación, pendiente, densidad, vigor, contenido de humedad, tipo de suelo, etc. En este sentido, varios autores han subrayado que la variabilidad de una cubierta es directamente proporcional a la resolución del sensor (Cushnie, 1987). Dicho de otro modo, cuanto mayor sea el detalle espacial registrado en la imagen, mayor será también su sensibilidad para detectar las variaciones internas de una categoría, antes ocultas bajo un pixel de mayor tamaño. Por cuanto, a mayor heterogeneidad, mayor mezcla con clases similares -y, en última instancia, mayor riesgo de confusiones en la asignación posterior-, un incremento en la resolución espacial puede complicar la clasificación digital. Este hecho, que parece contradecir el sentido común (mayor resolución espacial, mayor precisión), ha sido puesto de manifiesto por diversos autores, que lo denominan *'scene noise'*, ruido de la escena (Markham y Townshend, 1981). El efecto se ha comprobado más agudo en los tipos de cubierta más heterogéneos, como es el caso de las áreas urbanas, en donde un pixel de mayor tamaño facilita adquirir una

señal promedio de distintos componentes, mientras cuanto más se reduzca el pixel, los efectos de frontera son más intensos (Toll, 1984). Por el contrario, en categorías agrícolas y forestales, ese efecto es menos importante, siendo más convenientes las imágenes de alta resolución (Irons y Kennard, 1986; Hopkins et al, 1988).

La delimitación de campos de entrenamiento sobre la imagen de Madrid se realizó, en nuestro caso, acudiendo a la fotografía aérea y los trabajos de campo. Se delimitaron 23 áreas, correspondientes a 10 categorías: formaciones vegetales con especies de caducifolias, perennifolias poco densas y perennifolios densas, pastizal, matorral, suelos desnudos, edificación compacta, edificación exenta, áreas residenciales (con presencia de vegetación ajardinada), cultivos de regadío, áreas pavimentadas (infraestructuras y vías de comunicación) y láminas de agua. Se pretendía ensayar la aplicación de este método supervisado a la clasificación del conjunto de la imagen, comparando los resultados con los ofrecidos por el método no supervisado. A lo largo de este capítulo, iremos comentando el proceso seguido en ambos casos.

6.8.2.3. *Método no supervisado*

Este método se dirige a definir las clases espectrales presentes en la imagen. No implica ningún conocimiento del área de estudio, por lo que la intervención humana se centra más en la interpretación, que en la consecución de los resultados.

En esta estrategia, se asume que los ND de la imagen forman una serie de agrupaciones o conglomerados (*clusters*), más o menos nítidos según los casos. Estos grupos equivaldrían a pixels con un comportamiento espectral homogéneo y, por tanto, deberían definir clases temáticas de interés. Desgraciadamente, como se vio más arriba, estas categorías espectrales no siempre pueden equipararse a las clases informacionales que el usuario pretende deducir, por lo que resta a éste 'dar sentido', interpretar, el significado temático de esas categorías espectrales.

El método para definir los agrupamientos espectrales es muy similar al empleado en otras técnicas de clasificación automática de datos (Johnston, 1978; Hand, 1981). Se basa en un triple proceso: (i) selección de las variables que intervienen en el análisis; (ii) selección de un criterio para medir la similitud o distancia entre casos, y (iii) selección de un criterio para agrupar los casos similares.

En nuestro contexto, las variables son las bandas espectrales seleccionadas para la clasificación, ya sean éstas originales o fruto de alguna transformación (6.7). Los casos son los pixels que componen la imagen, cada uno de ellos definido por tantos ND como bandas intervienen en el análisis. En este espacio multivariado se trata de encontrar los grupos de pixels con ND similares, para luego equipararlos con alguna de las clases informacionales de nuestra leyenda.

El método para encontrar esos grupos homogéneos puede ilustrarse con el caso más simple, en el que estuviéramos trabajando con dos bandas (infrarrojo cercano y rojo, por ejemplo). En un gráfico bivariado aparecerían tantos puntos como pixels, localizados de acuerdo a sus ND en cada banda (fig. 6.54a). El gráfico evidencia la existencia de agrupaciones de pixels, con ND similares en las dos bandas, que podrían identificar clases temáticas de interés. Por ejemplo, los puntos situados en el vértice inferior izquierdo corresponderían a pixels con ND bajos en las dos bandas (A), los situados en el sector opuesto serían pixels con altos valores en ambas bandas (B), mientras los correspondientes al extremo inferior derecho implican ND bajos en la banda Roja y altos en la Infrarrojo cercano. En estas regiones del espectro, podríamos identificar estos grupos como pertenecientes a agua, suelos desnudos o vegetación, respectivamente, aunque en esta fase sólo nos interesa conocer que se trata de grupos homogéneos.

La delimitación de cada grupo espectral se inicia señalando dos criterios: uno que mida la similitud entre pixels, y otro que marque las condiciones del proceso de agrupamiento. En cuanto al primer aspecto, se han propuesto diversos criterios para medir la distancia entre pixels. El más utilizado es el de distancia euclidiana:

$$D_{a,b} = \sqrt{\sum_{k=1}^{m} (ND_{a,k} - ND_{b,k})^2} \qquad [6.44]$$

donde $D_{a,b}$, indica la distancia entre dos pixels cualquiera **a** y b; $ND_{a,k}$ y $ND_{b,k}$, los niveles digitales de esos pixels en la banda **k**, y **m** el número de bandas. En la literatura especializada, se citan otros criterios para medir la distancia, como sería el caso de la distancia media o la de Mahalanobis (Rebollo y Orti, 1980), si bien la distancia euclidiana resulta la más habitual en este tipo de aplicaciones.

En cuanto al algoritmo de agrupamiento, las opciones también son muy numerosas. Uno de los más extendidos es el denominado ISODATA

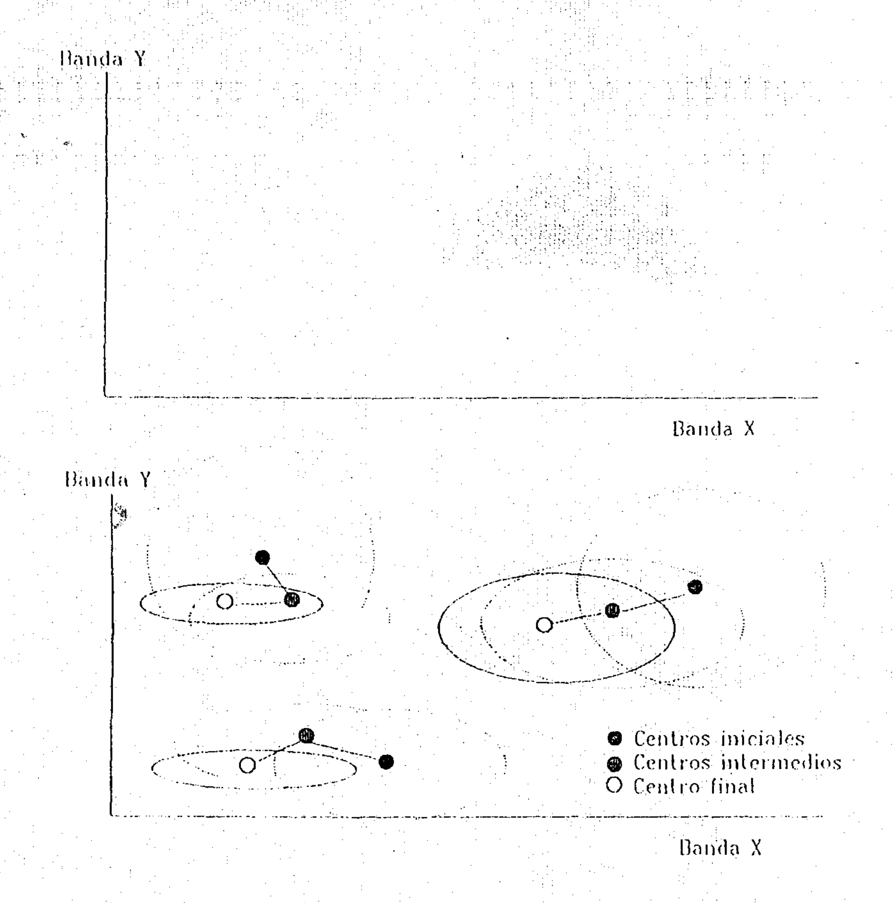


Fig. 6.54 - Fundamentos del análisis no supervisado

(Duda y Hart, 1973). En esencia, este algoritmo procede a partir de las siguientes fases (fig. 6.54b):

(i) se señalan una serie de centros de clase, de acuerdo al número y forma indicados por el usuario;

(ii) se asignan todos los pixels de la imagen al centro de clase más próximo;

(iii) se calculan de nuevo los centros de clase, teniendo en cuenta los valores de todos los pixels que se le hayan incorporado en la fase anterior;

(iv) se vuelven a asignar todos los pixels de la imagen al centro más cercano, el cual -debido al desplazamiento registrado en (iii)- no tiene por qué coincidir con la anterior asignación realizada en (ii);

(v) vuelven a calcularse los centros de clase, teniendo en cuenta las nuevas incorporaciones, y se retorna a la fase (iv).

El proceso se repite iterativamente hasta que el centro de clase no se desplace significativamente, lo que indica un buen ajuste a los grupos presentes en la imagen. Antes de iniciar una nueva iteración, el algoritmo interroga algunos parámetros de control introducidos por el usuario: ¿se ha alcanzado el número máximo de grupos para interrumpir el agrupamiento?, ¿algún grupo tiene un número de pixels inferior al mínimo señalado, en cuyo caso se suprime?, ¿algún grupo está a una distancia inferior a la mínima señalada entre grupos para realizar una fusión?, ¿algún grupo cuenta con una varianza superior a la máxima señalada para que éste sea dividido? Una vez solventadas estas cuestiones, o bien se procede a comenzar un nuevo bucle, o bien se finaliza si el desplazamiento entre grupos ha sido inferior al señalado por el usuario.

Desde el punto de vista estadístico, este algoritmo parece bastante adecuado para delimitar los grupos de valores homogéneos dentro de la imagen (Rebollo y Ortí, 1980). Sin embargo, en ocasiones resulta artificioso señalar unos parámetros de control significativos, puesto que el usuario no conoce, de partida, el número de grupos espectrales presentes en la imagen, ni el valor idóneo de dispersión interna o de distancia entre grupos. De esta forma, el análisis no supervisado se convierte en un proceso interactivo, en donde el usuario establece unos valores arbitrarios que se van modificando a la vista de los resultados.

Otro problema que entraña es el volumen de cálculo que precisa. Para mayor velocidad en la ejecución suele extraerse una muestra sistemática de la imagen (1 de cada 4, 8 ó 16 pixels, por ejemplo) sobre la que se aplica el algoritmo. Como consecuencia, no se clasifica la imagen completa, pero sí pueden identificarse los grupos presentes en ella, objetivo último del método no supervisado. Se han definido otros algoritmos para realizar este proceso (Rebollo y Ortí, 1980; Richards, 1986, pp. 190-205), pero no ofrecen ventajas significativas frente al arriba indicado.

Un buen grupo de autores considera el método no supervisado como una forma especifica de clasificación; esto es, como una estrategia completa, que abarca tanto la fase de entrenamiento como la asignación de los pixels de la imagen a las categorías de la leyenda. A nuestro juicio, supone más bien una forma alternativa de obtener las estadísticas de entrenamiento. En otras palabras, el análisis no supervisado se orienta no tanto a la clasificación de la imagen, como a definir precisamente los

grupos o categorías que intervendrán en la clasificación propiamente dicha. En este sentido, el método no supervisado podría considerarse como exploratorio (Mather, 1987), dirigido a deducir las clases espectrales presentes en la imagen. Bastará, para ello, realizar los cálculos sobre un muestreo sistemático de los pixels de la imagen, o sobre una serie de ventanas seleccionadas por el usuario. Esta opción agiliza notablemente los cálculos.

Como en el caso del método supervisado, es necesario analizar los pixels incluidos en cada grupo para obtener sus medidas estadísticas elementales: media, desviación típica, etc., que servirán para abordar la fase posterior de clasificación.

En el caso de la imagen de Madrid, el análisis no supervisado se realizó sobre las 7 bandas originales, extrayendo una muestra de 1 de cada 9 líneas y columnas. El programa utilizado para este análisis procede a construir grupos a partir de una ventana móvil de 3 x 3 pixels, hasta alcanzar el máximo de treinta, fijado en este caso. A partir de ahí, se procede a fundir aquellos grupos con una distancia espectral muy pequeña, concretamente 3 ND. Caso de que ninguno se ajuste a esta distancia, el programa calcula la desviación típica en el seno de cada grupo, fusionando aquellos con una dispersión superior a 1,2 desviaciones típicas, ó 5 % del coeficiente de variación. Por último, el usuario introduce un tamaño mínimo de cada grupo, por debajo del cual, el programa suprime el agrupamiento. En este caso, se mantuvo la opción por defecto, que concreta en 9 pixels esa frecuencia mínima. En razón de estos parámetros se dedujeron 19 clases espectrales, que sirvieron de entrada para la fase de asignación.

6.8.2.4. Métodos mixtos

Tanto el método supervisado como el no supervisado cuentan con ventajas e inconvenientes (Hoffer y Swain, 1980; Justice y Townshend, 1981). El primero resulta muchas veces subjetivo, pues el usuario establece a priori unas categorías sin valorar las características espectrales de la imagen. El segundo, no garantiza que las clases deducidas tengan significado para el usuario del producto, además de ser de difícil verificación.

Con objeto de paliar los inconvenientes de ambos métodos, se han propuesto diversas alternativas que los combinan de alguna forma. Estos métodos mixtos pueden agruparse en dos bloques:

(i) Por un lado, se sitúan aquellos trabajos que emplean el análisis supervisado para 'guiar' el no supervisado. En este caso, el conocimiento del intérprete se utiliza para orientar la búsqueda de esos grupos espectrales homogéneos. Por ejemplo, puede aplicarse el método no supervisado a áreas de la imagen con una cobertura conocida, lo que facilitaría la definición espectral de dicha cubierta (Justice y Townshend, 1981; Lachowski y Dietrich, 1978; Hoffer y Fleming, 1978). Otra forma de orientar al análisis no supervisado, consiste en introducir los ND medios de las categorías de interés -obtenidas a partir de los campos de entrenamiento- como centros iniciales de grupo. Gracias a ello, el proceso iterativo de búsqueda se reduce notablemente, a la vez que se predispone la formación de grupos con un significado temático (Chuvieco, 1985a).

(ii) Por otro lado, el análisis supervisado y el no supervisado pueden combinarse gracias a aplicarlos separadamente sobre la misma imagen, para luego sintetizar las medidas extraídas por ambos. Se asume que las categorías deducidas por los dos métodos pueden complementarse mutuamente, ganando en significado espectral e informacional las clases resultantes. Algunos autores, por ejemplo, emplean el análisis no supervisado para estratificar la imagen, quedando el supervisado para las áreas no clasificadas previamente (Bruneau y Gautier, 1981; Núñez et al, 1983). Más original resulta combinar categorías deducidas por los dos métodos, empleando un algoritmo de agrupación jerárquico. Esto permite crear un nuevo conjunto de categorías en donde se combina la información obtenida por ambos métodos (Chuvieco y Congalton, 1988a). En breves palabras, se trata de clasificar conjuntamente las categorías deducidas por el análisis supervisado y no supervisado sobre la misma imagen. Esta clasificación conjunta permite obtener tres tipos de grupos: unos formados por categorías supervisadas y no supervisadas; otros, sólo por categorías supervisadas, y un tercero, sólo por categorías no supervisadas. El primer grupo identifica aquellas clases seleccionadas por el intérprete que cuentan con un significado espectral claro. El segundo corresponde a clases informacionales con escaso significado espectral. Estas, al menos a priori, resultan de difícil asignación, ya que no se identifican con agrupaciones homogéneas de la imagen. Por último, el tercer grupo se refiere a clases espectrales no asimilables a la leyenda propuesta por el usuario. A partir del análisis de estos dos últimos grupos, el intérprete puede refinar el esquema de clasificación propuesto inicialmente.

6.8.2.5. Análisis de las estadísticas de entrenamiento

Independientemente del método empleado en definir la fase de entre-

namiento, antes de abordar el proceso de clasificación propiamente dicho, conviene reflexionar sobre la discriminabilidad de las categorías seleccionadas. En otras palabras, es preciso evaluar la viabilidad de que esas categorías puedan clasificarse sin grave riesgo de error. Si se comprueba que dos o más son muy similares, habría una gran probabilidad de confusión entre ellas, por lo que resultaría aconsejable: (i) confirmar que las estadísticas de entrenamiento han sido correctamente deducidas; (ii) adoptar una leyenda más general, con nuevas categorías que supongan una mezcla de las que ofrecen mayor riesgo de confusión; (iii) recabar información auxiliar o imágenes de otras fechas.

Existen varios métodos -tanto gráficos como numéricos- para evaluar las estadísticas de entrenamiento. Entre los gráficos, el más elemental es un diagrama de signaturas, donde figuran, en abcisas, las bandas que intervienen en el análisis, mientras en ordenadas los ND medios de cada categoría. Conviene no confundir este gráfico con las curvas espectrales presentadas en el capítulo 2. Por un lado, aquí no se incluyen valores de reflectividad, sino ND. Por otro, la señal recogida por el sensor corresponde a la anchura completa de la banda, y no sólo a su centro. Con estas

Tabla 6.11

Media y desviación típica de las categorías seleccionadas para la imagen de Madrid

Clase	TM1		TM2		TM3		TM4		TM5		TM7	
	Media	D.T.	Media	D.T.	Media	D.T.	Media	D.T.	Media	D.T.	Media	D.T.
Caducif.	75,63	3,82	31,30	2,58	29,03	3,77	78,27	4,45	63,10	5,64	23,37	4,09
Peren.Den	76,71	2,72	32,38	2,17	33,59	4,38	52,84	4,37	62,38	9,00	26,74	4,30
Peren-Mat.	80,59	3,76	34,16	2,74	36,41	4,76	64,65	3,02	78,52	10,44	33,50	6,28
Pastizal	96,92	3,38	48,14	2,29	67,28	4,53	80,83	3,59	128,86	4,81	53,44	1,88
Matorral	99,39	4,27	48,57	2,87	66,10	3,74	76,64	3,10	125,80	8,32	53,21	5,31
Suelos	124,94	5,58	71,09	4,28	105,19	6,95	116,45	5,69	163,00	7,32	68,97	3,75
Urb.denso	97,89	6,17	43,96	3,72	54,43	6,06	47,04	5,82	84,42	17,72	57,09	12,00
Urb.exent	128,20	12,47	62,60	7,60	75,00	9,34	67,77	6,91	99,51	16,90	61,99	11,69
Residenc.	95,56	5,49	45,00	3,46	51,44	6,68	85,70	3,67	98,11	14,73	43,79	7,15
Infraest.	172,61	10,84	84,94	6,74	99,71	8,43	78,61	6,74	116,00	12,60	88,16	8,42
Regadío	78,20	2,41	34,82	1,39	29,23	2,36	124,44	5,02	69,93	4,25	20,99	2,54
Esp.Verdes	89,73	1,48	44,18	1,53	44,09	2,39	116,36	4,31	109,73	1,91	39,54	2,54
Agua	67,68	1,24	25,52	0,63	19,14	0,81	9,94	0,58	7,08	1,28	4,18	0,94

salvedades, este gráfico resulta muy útil para proporcionar una primera valoración de las tendencias espectrales de cada categoría. Identifica, además, aquellas bandas en las que manifiesta un comportamiento peculiar respecto a clases vecinas. Las líneas paralelas y próximas indican un probable solape entre categorías, mientras las intersecciones entre líneas manifiestan las bandas donde es más probable separar a las categorías que representan.

En el caso de la imagen de Madrid, la tabla 6.11 recoge algunas medidas estadísticas obtenidas para las categorías seleccionadas previamente. A partir de su media y desviación típica en 6 de las 7 bandas que forman la imagen -se ha excluido la térmica por ser poco sensible para mostrar contrastes entre las cubiertas que forman la escena-, pueden extraerse una primera valoración del significado espectral de estas cubiertas. El valor medio nos informa del comportamiento espectral modélico, mientras la desviación típica refiere al grado de homogeneidad que aparece en torno a ese valor central. Los valores más altos de desviación típica corresponden a las categorías urbanas, como consecuencia del complejo entramado espacial que las constituyen. Tejados, vías de comunicación, lugares de recreo o espacios verdes pueden convivir en un mismo sector, haciendo muy complicada cualquier caracterización estadística. Entre las tres categorías urbanas, la más homogénea corresponde al centro de la ciudad, como consecuencia de ser una zona más densamente edificada, con viales de escasa anchura, resultando dominante la respuesta espectral de los edificios. Lo que hemos denominado ur-

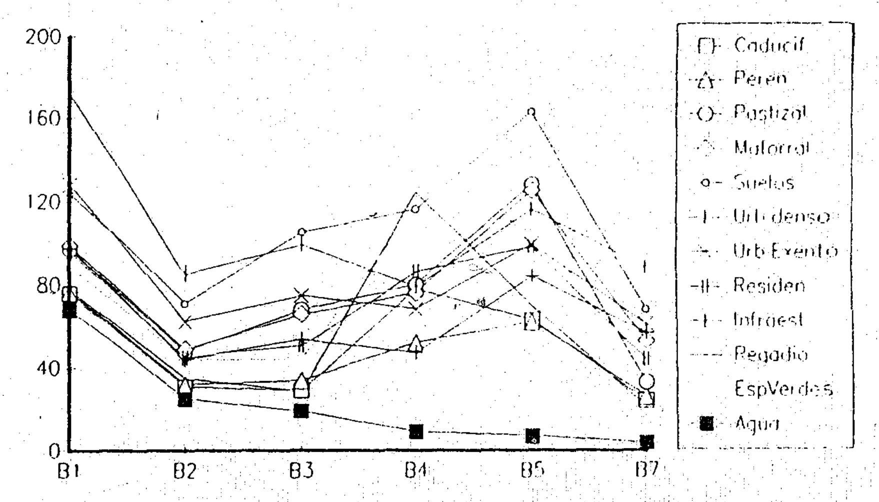


Fig. 6.55 - Diagrama de signaturas espectrales para las cubiertas que intervienen en la clasificación

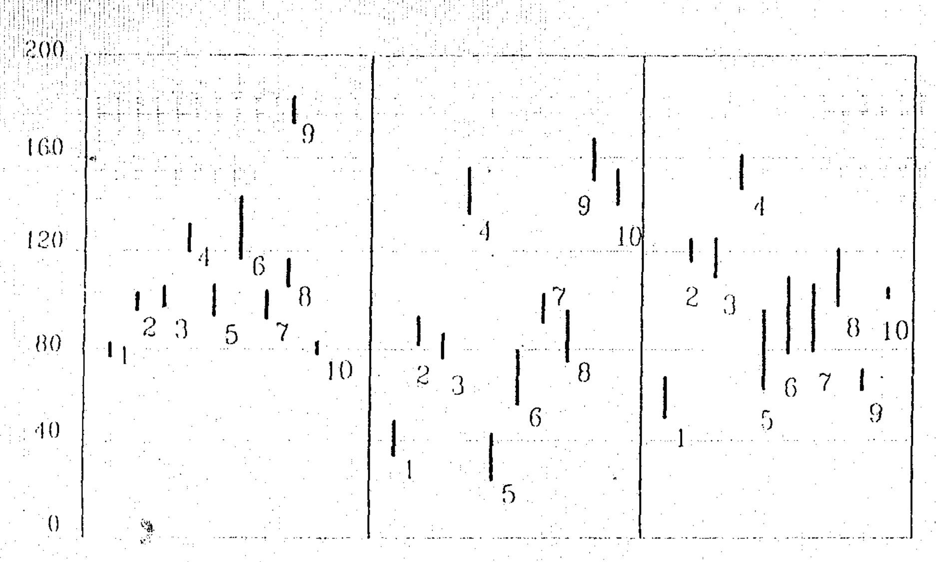


Fig. 6.56 - Diagrama de confusión espectral entre cubiertas: (1) Caducifolios, (2) Perennifolios, (3) Pastizal, (4) Matorral, (5) Suelos desnudos, (6) Urbano denso, (7) Urbano exento, (8) Residencial, (9) Infraestructuras, (10) Espacios verdes

banización exenta intenta delimitar los barrios periféricos de la ciudad, con edificación prevalentemente abierta y alternante con espacios verdes o solares sin edificar. De igual modo, las áreas residenciales ofrecen escasa homogeneidad, con altos valores de desviación típica en todas las bandas. Como consecuencia de esta escasa homogeneidad espectral, las categorías de componente urbano, tan importantes para esta particular imagen, son muy complejas de clasificar digitalmente, ya que ofrecen solapes con cubiertas naturales, ya sea suelos desnudos (edificación poco densa), ya con vegetación vigorosa (edificación residencial con espacios verdes). A continuación tendremos oportunidad de estudiar, con más detalle, estos problemas.

A partir de estos parámetros, puede construirse el gráfico de signaturas, tal y como se describió más arriba (fig. 6.55). Se aprecia ya una primera valoración de los rasgos espectrales de cada tipo de cobertura. Como antes se indicó, el agua ofrece el comportamiento más peculiar, con valores crecientemente inferiores según se avanza hacia el infrarrojo medio. Las caducifolias, cultivos regados y espacios verdes, ofrecen rasgos similares, con valores bajos en las bandas visibles y altos en el infrarrojo cercano. Los suelos ofrecen un comportamiento más regular, mientras las diversas cubiertas urbanas, muestran un carácter intermedio entre las cubiertas vegetales y los suelos desnudos.

Desgraciadamente la realidad es más compleja de lo que ofrece este gráfico, puesto que aquí sólo se refleja la tendencia media, sin considerar la variación propia de cada categoría, principal responsable de las confusiones con otras clases vecinas. Una idea más clara de estos solapes, puede obtenerse a partir de un gráfico de dispersión espectral. Se trata de un diagrama de barras que recoge, en cada banda y para cada categoría, el rango digital cubierto por la media más y menos una o dos desviaciones típicas (fig. 6.56). Aquí se observa con mayor nitidez la importante dispersión de las categorías urbanas, fuente de notables solapes con matorral, pastizal y cubiertas vegetales. También resulta evidente la separabilidad del agua, y las confusiones entre las especies perennifolias.

Otra forma de representar los solapes entre categorías, consiste en realizar una histograma de frecuencias de los ND que la componen. Por cuanto aquí sólo se cuenta con una muestra y no el total de estos ND, una alternativa para representar esta distribución de frecuencias parte de asumir que los ND en el seno de cada categoría se distribuyen normalmente. Esto permite reconstruir su distribución, a partir de conocer su media y desviación típica. De esta forma, se construye la figura 6.57, que ofrece otra visión de los problemas de superposición entre clases. Lógicamente, cuanto mayor sea el solape entre categorías, mayor la probabilidad de confusión al intentar discriminarlas, por lo que este tipo de gráficos nos ofrecen una primera valoración del error previsible en la posterior clasificación.

Además de los procedimientos gráficos, existen algunos criterios cuantitativos que permiten evaluar numéricamente la posibilidad de dis-

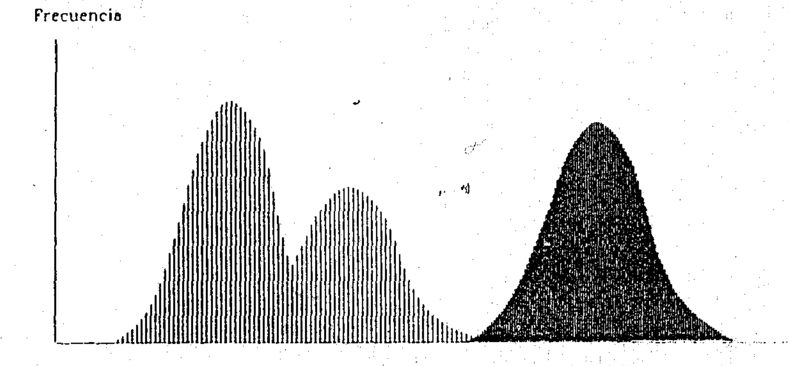


Fig. 6.57 - Representación de las clases como distribuciones normales

criminar las distintas categorías. El más sencillo es el denominado separabilidad estadística (Swain y Davis, 1978):

$$D_{norm\,A,B} = \frac{\left| \overline{ND}_A - \overline{ND}_B \right|}{s_A + s_B} \quad [6.45]$$

esto es, la distancia normalizada entre las clases A y B es fruto de establecer su diferencia absoluta entre medias, promediada por la suma de sus desviaciones típicas. Esta medida se aplica a cada par de bandas que intervienen en la clasificación.

Un poco más compleja, y también más versátil, es la divergencia estadística (Swain y Davis, 1978; Thomas et al, 1987). Aquí, se parte de asumir que los ND en una categoría se distribuyen normalmente, asumiendo la separabilidad como la medida del solape entre categorías vecinas. Por cuanto se trata de calcular ese valor para un espacio multivariado (tantas variables como bandas intervienen en el proceso), se considera el vector de medias y matriz de varianza-covarianza entre pares de categorías. La fórmula de cálculo se sintetiza de la forma siguiente:

$$D_{AB} = 0{,}5\ \mathrm{Tr}\ [(V_A - V_B)\,(V_B^{-1} - V_A^{-1})] +$$

$$0{,}5\ \mathrm{Tr}\ [(V_A^{-1} + V_B^{-1})\,(M_A - M_B)(M_A - M_B)^T] \quad [6.46]$$

donde D_{AB} indica la medida de la divergencia entre las categorías A y B; Tr, se refiere a la traza o suma de los elementos de la diagonal de la matriz indicada [ ]; V_A y V_B son las matrices de varianza-covarianza de las categorías A y B; M_A y M_B son los vectores de medias correspondientes a las mismas categorías y bandas, y ^{T} indica la matriz transpuesta de la indicada entre corchetes. Cuanto mayor sea el valor de la divergencia, mayor también la separabilidad entre clases, basada, lógicamente, sobre las bandas que se han considerado en su cálculo.

Algunos autores han propuesto transformar este valor, de tal forma que pueda escalarse de acuerdo a un rango conocido. Así, se formula la divergencia transformada (Kumar y Silva, 1977).

$$DT_{AB} = c\ (1 - \exp\ (-D_{AB})/8) \quad [6.47]$$

donde c es una constante introducida para escalar el resultado entre unos rangos conocidos. Algunos autores recomiendan emplear un valor de 2.000 (Haack, 1983), si bien otros son más partidarios de un valor 100

Tabla 6.12
Separabilidad estadística entre las categorías seleccionadas para la imagen de Madrid

	Caduc.	Perenn	Per-Mat	Past.	Mator.	Suelos	UrbDn	UrbEx	Resid	Infraes	Regad
Caducif.	0,00										
Perenn.	28,87	0,00									
Per-Mato	29,33	21,59	0,00								
Pastizal	89,54	88,58	68,40	0,00							
Matorral	87,40	85,21	65,42	5,89	0,00						
Suelos	154,73	158,30	138,63	73,65	76,84	0,00					
UrbDenso	64,66	49,87	40,32	57,93	52,95	123,40	0,00				
UrbExent	94,08	90,06	76,47	50,60	46,45	87,62	49,35	0,00			
Residenc.	54,65	59,14	38,94	36,87	35,85	101,60	63,47	50,64	0,00		
Infraest.	157,66	154,22	140,40	97,53	95,57	80,64	110,97	66,22	110,68	0,00	
Regadío	47,00	73,88	64,71	95,40	95,58	145,00	94,93	106,06	63,09	160,70	0,00
Agua	91,96	78,83	100,62	164,58	160,63	231,88	115,70	153,98	135,44	213,97	133,01

(Mather, 1987), para que los valores de divergencia puedan interpretarse como porcentajes.

La divergencia también se ha empleado como medida para seleccionar el conjunto de bandas que proporciona la mejor separación entre clases. En este sentido se calcula un valor promedio de divergencia, del cual puede deducirse la combinación idónea de bandas que ofrece la mejor separabilidad global (Jensen, 1986, pp. 200-202). Además de la divergencia, se han propuesto otras medidas de separabilidad, como la distancia de Bhattacharyya o de Mahalanobis (Richards, 1986; Thomas et al, 1987).

La tabla 6.12 incluye el cálculo de la separabilidad estadística para las clases seleccionadas sobre la ciudad de Madrid. En este caso, la medida empleada ha sido la distancia normalizada [6.45], más sencilla en el cálculo que las otras medidas.

Esta tabla nos permite confirmar las valoraciones previamente efectuadas sobre posibles confusiones entre clases. La clase más nítida es el agua, fácilmente separable del resto de las cubiertas, por su peculiar comportamiento espectral. Los suelos desnudos, con poca o nula vegetación también se diferencian con nitidez de cualquier cubierta vegetal o espacios edificados, salvo para la urbanización exenta e infraestructuras, en donde la ausencia de vegetación es más evidente. La

mínima distancia entre campos de entrenamiento se encuentra en las clases pastizal y matorral, posiblemente como consecuencia de que éste se señaló sobre una ladera miocénica de escasa densidad vegetal. Más adelante veremos que esta proximidad espectral generó, en última instancia, un claro solape entre ambas cubiertas, lo que hizo necesario refinar posteriormente la fase de entrenamiento.

Como principal conclusión de este epígrafe, parece deducirse que el análisis de las estadísticas de entrenamiento resulta muy conveniente para reflexionar sobre la conveniencia de la leyenda empleada, del tipo de información disponible, o del método emprendido para conseguir los resultados deseados. Salvado este análisis, puede iniciarse la fase de clasificación propiamente dicha, en la que no deben de producirse resultados muy distintos a los deducidos a partir de este previo estudio.

6.8.3. Fase de asignación

Una vez culminada la selección y estudio de las categorías que intervendrán en la clasificación, se inicia la siguiente fase, denominada de asignación, por cuanto se trata de adscribir cada uno de los pixels de la imagen a una de las clases previamente seleccionadas. Esta asignación se realiza, naturalmente, en función de sus ND, para cada una de las bandas que intervienen en el proceso. Fruto de esta fase será una nueva imagen, cuyos ND expresen la categoría en la cual se ha incluido cada uno de los pixels de la imagen original.

En este capítulo se tratan los criterios más empleados para realizar este proceso, en el contexto de las aplicaciones de la teledetección. Desde un punto de vista estadístico, todos ellos definen un área de dominio, en torno al centro de cada categoría a discriminar, mediante un conjunto de funciones discriminantes. Estas ecuaciones pueden considerarse, por tanto, como las fronteras que definen cada categoría. El pixel será asignado a una clase i, si sus ND se encuentran dentro del área de dominio asignado a dicha clase (fig. 6.58).

Los criterios más comunes para establecer estas fronteras estadísticas entre clases son: (i) mínima distancia, por el cual el pixel se asigna a la clase más cercana; (ii) paralelepípedos, que permite señalar al usuario unos umbrales de dispersión asociados a cada clase, y (iii) máxima probabilidad, en donde el pixel se asigna a aquella clase con la que posee mayor probabilidad de pertenencia. Frecuentemente se suelen agrupar en métodos no paramétricos, los dos primeros, y paramétricos, el último, en

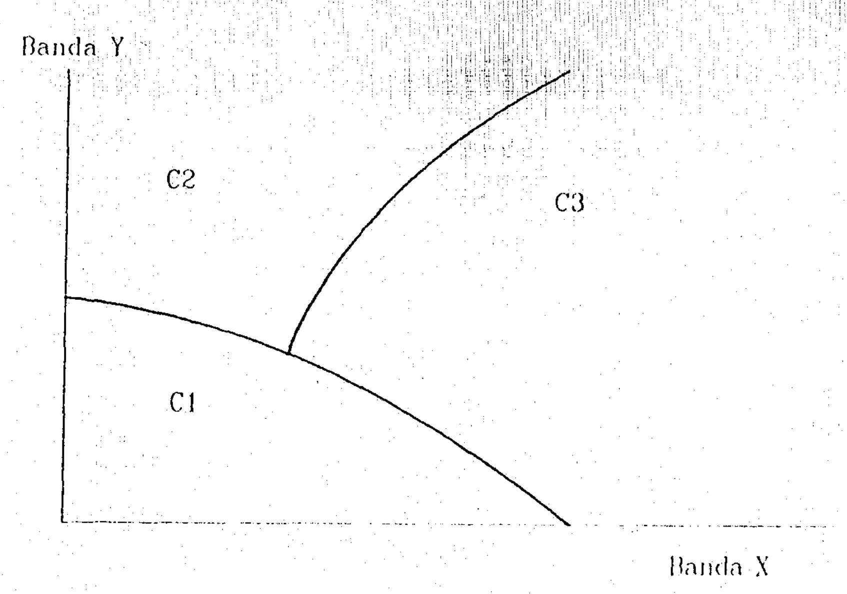


Fig. 6.58 - Funciones discriminantes para la asignación digital

razón de si asumen o no que los ND en cada categoría se distribuyen normalmente. A continuación se describen, con más detalle, cada uno de estos criterios.

6.8.3.1. Clasificador de mínima distancia

El criterio más sencillo para asignar un pixel a una de las categorías consiste en incluirlo en la más cercana; esto es, en aquella que minimice la distancia entre ese pixel y el centroide de clase. Lógicamente, no se trata de una distancia geográfica, sino espectral, consecuencia de comparar los ND de cada pixel con los del centro de las distintas categorías, para todas las bandas que intervienen en el análisis.

Pueden considerarse varias formas de medir esa distancia espectral entre pixels y clases. La más empleada, en este sentido, es la distancia euclidiana:

$$d_{x,A} = \sqrt{\sum_{k=1}^{m} (ND_{x,k} - \overline{ND}_{A,k})^2} \qquad [6.48]$$

donde d_{xA} es la medida de la distancia entre el pixel x y la categoría A, que se calcula como la raíz cuadrada del sumatorio de las diferencias entre el ND de ese pixel y el ND medio de la categoría A, para las m bandas que intervienen en la clasificación. Tras calcular esta medida para todas las categorías, puede obtenerse el valor d_{xA} más pequeño, asignando el pixel x a esa categoría (fig. 6.59).

Este algoritmo es bastante sencillo y rápido de ejecutar, y puede ofrecer buenos resultados cuando no se observe un gran solape entre categorías. Puesto que siempre existe una clase más cercana, no deja lugar a pixels sin clasificar, incluso aunque éstos se alejen notablemente del centro de clase. Esto puede provocar errores de comisión importantes, sobre todo cuando no se incluye en la leyenda alguna categoría claramente presente en la imagen.

La distancia que calcula este algoritmo es lineal, sin considerar la propia dispersión de cada categoría o la correlación que exista entre las bandas. Tiende, por tanto, a delimitar grupos circulares de radio proporcional a la situación de cada categoría.

Algunos autores han propuesto modificaciones en el cálculo de la distancia, de tal forma que se considere la varianza de las clases (Schowengerdt, 1983; Lo et al, 1986). De una u otra forma, el método de mínima distancia se ha empleado con frecuencia en aplicaciones temáticas, especialmente cuando el área de estudio no presentaba una gran complejidad (Sellman, 1977). Una excepción interesante a esta idea general es su aplicación a la cartografía de paisajes gallegos (López-Vizoso, 1989).

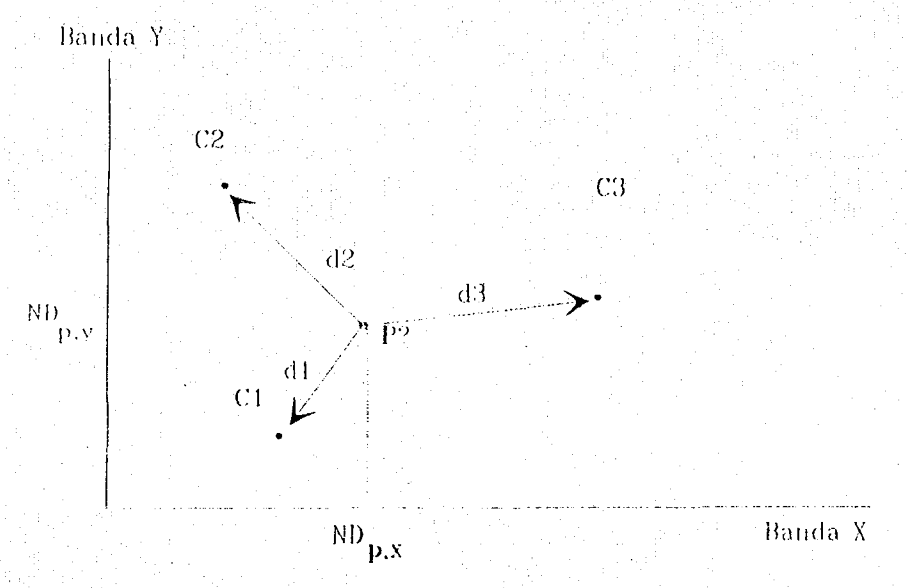


Fig. 6.59 - Algoritmo de mínima distancia

6.8.3.2. *Clasificador de paralelepípedos*

En este método, el usuario fija un área de dominio para cada categoría, teniendo en cuenta sus valores de centralidad y dispersión. Posteriormente, un pixel es asignado a dicha clase si sus ND están dentro de ese área de dominio, en todas las bandas consideradas. Esquemáticamente, el pixel x será asignado a la clase A si:

$$\overline{ND}_{Ak} - R_{Ak} < ND_{xk} < \overline{ND}_{Ak} + R_{Ak} \qquad [6.49]$$

para todo k, variando k de 1 hasta el número de bandas. R_{Ak} indica el rango de dispersión concedido a cada categoría, y en cada banda.

En suma, el pixel x es asignado a la clase A si sus ND se encuentran a menos de una determinada distancia del centro de clase A. Esa distancia se fija por el intérprete, aunque suele identificarse con la desviación típica, o con un múltiplo suyo. También pueden emplearse otros criterios como la desviación media, desviación intercuartílica o rango de la categoría. En cualquier caso, conviene considerar que cuanto mayor sea ese umbral, mayor también el número de pixels incluidos en esa categoría, pero también más grande el riesgo de confusiones con categorías vecinas. De igual forma, un valor pequeño garantiza mayor fiabilidad en las asignaciones, pero supone asimismo un mayor número de pixels sin clasificar.

Este criterio de asignación tiende a delinear unos polígonos multidimensionales de lados paralelos, de ahí su nombre (fig. 6.60), en torno al centro de cada categoría. Es un algoritmo muy rápido de ejecutar, puesto que no requiere cálculos aritméticos, sino sólo operaciones lógicas (tipo IF ... THEN). Por esta rapidez, se ha utilizado con frecuencia como primer acercamiento a la variabilidad de las distintas categorías (Miller y Williams, 1978; Robinove, 1979). Asimismo, se ha utilizado para lograr una primera estratificación de la imagen, aislando las categorías más singulares, para aplicar posteriormente un criterio de asignación sobre los pixels más problemáticos (Núñez et al, 1983; Mather, 1987).

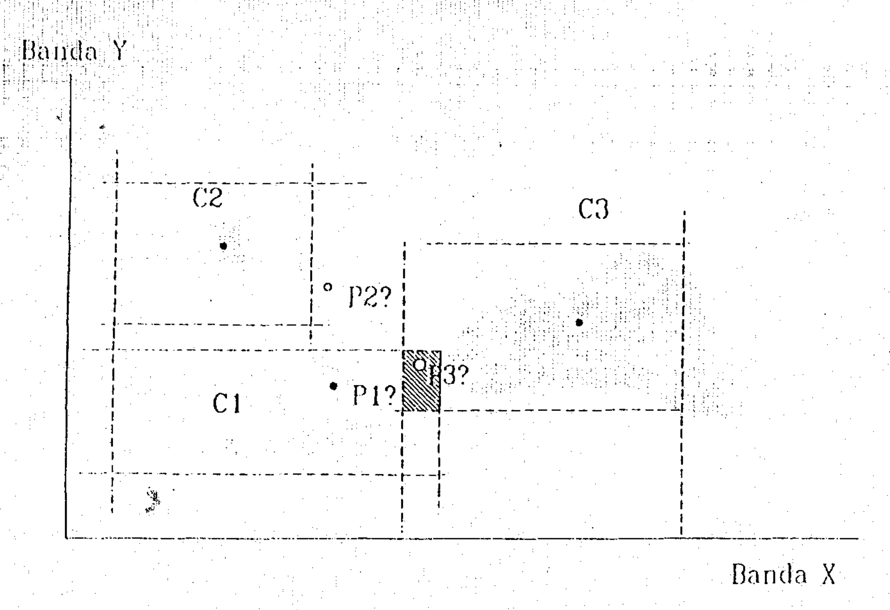


Fig. 6.60 - Algoritmo de paralelepípedos

Los principales problemas de este método parten de su misma concepción. El diseño de áreas de dominio implica, por un lado, que haya pixels en zonas comunes a dos o más categorías, y, por otro, que algunos pixels queden sin clasificar.

Respecto al primer problema, el solape entre paralelepípedos supone que un pixel pueda asignarse a dos categorías. Si el ordenador no cuenta con otro criterio, lo incluirá en la primera que cumpla los requisitos marcados en [6.49]. En consecuencia, algo tan intrascendente como el orden en el que se produce la asignación tiene una importante repercusión sobre los resultados. Algunos autores han propuesto modificar el criterio de asignación para estas áreas en conflicto, bien introduciendo la regla de mínima distancia (Wagner y Suits, 1983; Cosentino et al, 1981), bien ajustando interactivamente las fronteras entre clases (Lillesand y Kiefer, 1987).

Respecto a los pixels sin clasificar, la solución pasa por ampliar paulatinamente el rango de dispersión, estableciendo un equilibrio entre los pixels no clasificados y los solapes entre clases vecinas. También conviene, en estos casos, repasar la definición espectral de las categorías,

puesto que la presencia de pixels sin asignación es indicio de clases espectrales mal definidas o no incluidas en la leyenda de trabajo.

6.8.3.3. Clasificador de máxima probabilidad

Este método considera que los ND en el seno de cada clase se ajustan a una distribución normal. Esto nos permite describir esa categoría por una función de probabilidad, a partir de su vector de medias y matriz de varianza-covarianza. En pocas palabras, esa función asemeja la distribución real de los ND en esa categoría, por lo que nos sirve para calcular la probabilidad de que un pixel (con un determinado ND) sea miembro de ella. El cálculo se realiza para todas las categorías que intervienen en la clasificación, asignando el pixel a aquella que maximice la función de probabilidad.

El clasificador de máxima probabilidad es el más complejo y el que demanda mayor volumen de cálculo. Sin embargo, es el más empleado, por su robustez y por ajustarse con más rigor a la disposición original de los datos.

6.8.3.3.1. Fundamento del método

Para comprender mejor su funcionamiento, basta poner un sencillo ejemplo ideado por Swain y Davis (1978). Supongamos que se cuenta con dos pares de dados, uno normal (caras numeradas de 1 a 6) y otro con un par de puntos adicionales en cada cara (numerados de 3 a 8). Conociendo el valor de una tirada, el problema sería estimar de cual de los dos pares de dados procede. Un criterio razonable de asignación sería calcular la probabilidad de que esa tirada se haya realizado con los dados normales o con los aumentados, asignándola a la más probable. Por ejemplo, si obtenemos un tirada de 7, la probabilidad de haber tirado con los dados normales es 6/36 (6 casos favorables, frente a los 36 posibles)[4]. Para los dados aumentados, la probabilidad es menor, 2/36[5], por lo que la tirada se asigna al par de dados normal.

El mismo criterio puede seguirse para cualquier otra puntuación. Basta construir las funciones de probabilidad asociadas con cada par de dados.

[4] Podría haberse obtenido un 7 por las siguientes combinaciones de los dos dados: 1 y 6, 6 y 1, 2 y 5, 5 y 2, 3 y 4, y 4 y 3.

[5] Sólo puede obtenerse un 7, en este caso, por combinación de 3 y 4, y 4 y 3.

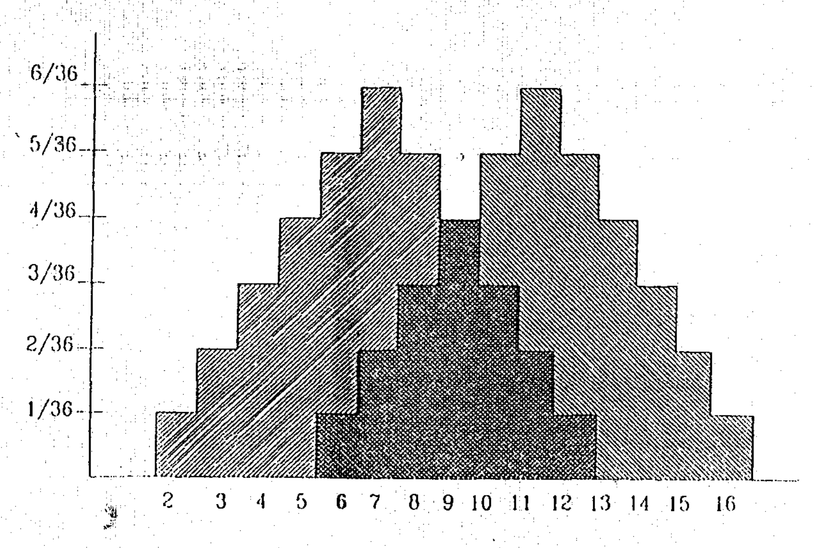


Fig. 6.61 - Fundamentos del algoritmo de máxima probabilidad

Para el par normal, tendríamos una distribución centrada en el valor 7, con un mínimo de 2 y un máximo de 12. Para el par aumentado, el valor máximo se encuentra en 11, con un mínimo de 6 y un máximo de 16 (fig. 6.61). A partir de esta gráfica, se observa que la probabilidad de haber usado los dados normales es mayor si obtenemos una tirada inferior a 8; es menor si la tirada superó 10 y es idéntica si la tirada fue 9. En definitiva, la frontera entre ambos tipos de dados se establece en la intersección entre sus respectivas funciones de probabilidad.

Esto no significa, obviamente, que no pueda producirse una tirada mayor a 9 con el par de dados normal, ni inferior a 9 con el aumentado. En otras palabras, la regla no es completamente certera, pero sí bastante razonable. Sólo es plenamente fiable para valores superiores a 12 o inferiores a 6, puesto que ahí no existe solape entre categorías. En suma, si existe conflicto natural entre clases, no es posible separarlas con total fiabilidad. Los errores serán tanto mayores cuanto mayor sea el solape entre las funciones de probabilidad.

El ejemplo puede aplicarse fácilmente al contexto de la clasificación digital. Los dados pueden sustituirse por las distintas categorías que quieren discriminarse, y las tiradas por los ND de los pixels a clasificar. En el caso de los dados, podíamos estimar la probabilidad de pertenencia asociada con cada tirada. Aquí, es preciso estimar ese valor de probabilidad para cada categoría, a partir de las medidas realizadas sobre las áreas de entrenamiento. Para ello, se considera que los ND en el seno de cada categoría se distribuyen de acuerdo a la distribución normal, por lo que basta conocer la media y la desviación típica de cada categoría, para calcular la probabilidad asociada con un determinado ND. Para el caso de trabajar con una sóla banda, podríamos calcular esa probabilidad de acuerdo a:

$$p\,(x/A) = \frac{1}{\sqrt{2\,\pi\,\sigma_A^2}} \exp\{-(ND_x - \overline{ND_A})^2 / 2\,\sigma_A^2\} \qquad [6.50]$$

Esto es, la probabilidad de que un pixel x, definido por un determinado ND_x, pertenezca a la clase A, puede calcularse a partir de la media ($\overline{ND_A}$) y la varianza (σ_A^2) de esa clase. Una vez derterminada la probabilidad de pertenencia al resto de las categorías que intervienen en la clasificación, ese pixel será asignado a la clase A, sólo si:

$$p\,(x/A) \geq p\,(x/B) \qquad [6.51]$$

para todo A ≠ B, variando B desde 1 hasta n, siendo n el número de categorías.

Desde el punto de vista del ordenador, el cálculo resulta más sencillo cuando se transforma la fórmula anterior en una función lineal, mediante el empleo de logaritmos (Schowengerdt, 1983):

$$\ln p\,(x/A) = -0{,}5 \ln(2\pi) - 0{,}5 \ln \sigma_A^2 - \{(x - \overline{ND_A})^2 / 2\sigma_A^2\} \qquad [6.52]$$

La expresión pueden simplificarse aún más si eliminamos el primer término (-0.5 ln (2π)), por cuanto nos interesa sólo un cálculo de la probabilidad relativo a las distintas clases, y ese valor es una constante para todas las categorías. Por la misma razón, no resulta necesario reconvertir a antilogaritmos el valor calculado, ya que si el logaritmo de la probabilidad es mayor en una categoría que en otra, también lo será su antilogaritmo. Por último, el segundo término (0,5 ln σ_A^2 puede calcularse inicialmente, para cada categoría, quedando así reducido el cálculo, por pixel, a la última expresión.

Volviendo al ejemplo anterior, podría también ocurrir que contáramos con dos pares de dados normales y sólo con uno aumentado. En este caso, no sólo tendremos que considerar el valor de la tirada para identificarla como perteneciente a uno u otro tipo de dados, sino también la probabilidad a priori de que aparezca una tirada de cada par de dados, en

función de su número. En muchas aplicaciones de la teledetección también se produce este fenómeno. Algunas de las categorías cuentan con mayor extensión superficial, y, por tanto, presentan mayor probabilidad de albergar pixels desconocidos. Al considerar la probabilidad a priori de cada categoría p(A), se introduce un nuevo factor en el criterio de decisión arriba enunciado [6.51]. De esta forma, un pixel pertenece a la clase A, si:

$$p(x/A)\, p(A) \geq p(x/B)\, p(B) \qquad [6.53]$$

para todo $B \neq A$, donde p (x/A) indica la probabilidad de que un pixel x con un ND determinado, pertenezca a la clase A, y p (A) la probabilidad a priori de que un pixel cualquiera se incluya en esa clase.

La figura 6.62 expresa gráficamente el efecto de introducir esta opción, denominada clasificación bayesiana (Schowengerdt, 1983). El punto de corte entre las distribuciones de probabilidad, se desplaza hacia un lado u otro del original, en función del valor de la probabilidad a priori. Recuérdese que la intersección entre curvas marca la frontera en el área asignada a cada categoría, por lo que este factor puede modificar significativamente los resultados.

Con ser de gran interés, el empleo de este parámetro resulta bastante complejo, especialmente para establecer un criterio riguroso que permita estimar los valores de probabilidad a priori para cada clase. Un posible criterio sería conceder a cada categoría una probabilidad equivalente a

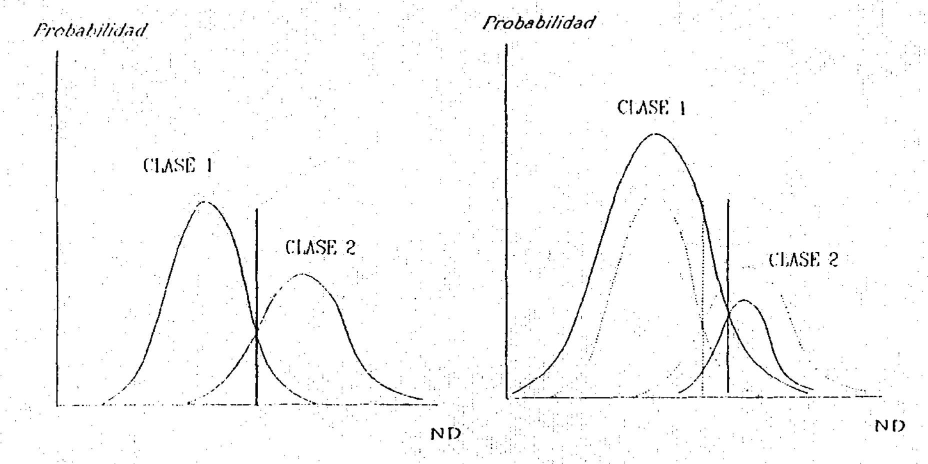


Fig. 6.62 - Efecto de considerar la probabilidad a priori

lente a la superficie que ocupa en la zona de estudio. Esto requiere, naturalmente, contar con un inventario previo, que raras veces está disponible. Indirectamente, sin embargo, puede calcularse la importancia superficial de cada clase mediante trabajos de campo, datos auxiliares o empleando los resultados de una clasificación previa. Por último, también puede optarse por obviar este criterio, simplemente otorgando la misma probabilidad a priori a todas las categorías.

El interés de ponderar la probabilidad de cada clase se ha puesto en evidencia por distintos autores (Strahler, 1980). Miller y colaboradores (1978) obtienen mejores resultados en su clasificación de espacios forestales en Tailandia mediante la inclusión de probabilidades a priori para cada categoría. Mergerson (1981) aplica este criterio a la elaboración de estadísticas de cultivo, mientras Valerio y Ledesma (1981) lo hacen a la estimación de recursos naturales. Nosotros mismos tuvimos ocasión de comprobar cómo la ponderación a priori de la probabilidad tendía a reducir los errores de comisión, para aquellas categorías de escaso desarrollo superficial, como cultivos regados o árboles de ribera. Estos, sin considerar la probabilidad, tendían a albergar pixels de categorías más importantes, como prados de montaña o bosques de caducifolias (Chuvieco, 1985a).

6.8.3.3.2. Extensión a varias bandas

Hasta el momento, hemos analizado el criterio de máxima probabilidad para el caso de una sola banda. Lo habitual será, no obstante, que se empleen varias bandas para la clasificación, por lo que resulta preciso extender a varias dimensiones lo hasta aquí comentado.

Para el caso de dos dimensiones (dos bandas), los límites de las categorías tienen una forma elipsoidal (fig. 6.63). Cada una de estas elipses define un determinado nivel de probabilidad asociado a una categoría. Cuanto mayor sean las zonas de solape entre categorías, tanto mayor el riesgo de confusión mutua.

Con más de dos dimensiones, no es posible representar gráficamente este criterio de clasificación. Basta extender la fórmula de la probabilidad normal arriba apuntada:

$$p(x/A) = 2\pi^{-m/2}\, |V_A|^{0,5} \exp\left(-0{,}5\, (X - M_A)^T\, V_A^{-1}\, (X - M_A)\right) \qquad [6.54]$$

donde m indica el número de bandas, $|V_A|$ la determinante de la matriz de varianza-covarianza para la clase A; X el vector de ND asociado con

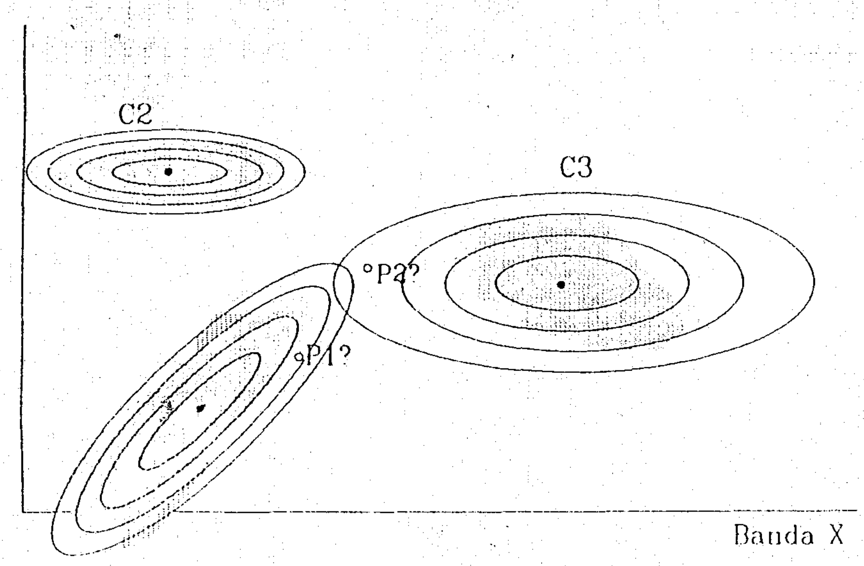


Fig. 6.63 - Extensión a dos bandas del algoritmo de máxima verosimilitud

el pixel x; M_A, el vector de ND medios de la categoría A, y los superíndices t y -1, la transpuesta y la inversa de las matrices a las que afectan, respectivamente. Esta fórmula también puede simplificarse mediante el uso de logaritmos (Schowengerdt, 1983):

$$\ln p\,(x/A) = [-0{,}5 \ln V_A] - [\,0{,}5\,(X - M_A)^T\, V_A\, (X - M_A)] \qquad [6.55]$$

una vez suprimidos los términos constantes de la fórmula anterior.

Pese a estas simplificaciones, este método de asignación exige un gran volumen de operaciones. Con el fin de reducir el tiempo invertido en el proceso, algunos autores han propuesto métodos alternativos para el cálculo de la probabilidad. Las tablas de probabilidad, similares a las CLUT vistas anteriormente (6.6.1.2), parecen ser la solución más ventajosa a este respecto (Loomer, 1987; Mather, 1987, pp. 304-307).

Una vez que el ordenador culmine la asignación de los pixels de la imagen, es posible establecer unos umbrales de probabilidad para cada categoría, de tal forma que se rechacen aquellos pixels con una probabilidad de pertenencia muy baja (fig. 6.64). Este proceso, posterior a la clasificación propiamente dicha, pretende evitar aquellos pixels con un grado de asociación muy bajo, reduciendo así los errores de comisión debidos a una mala definición espectral de algunas categorías.

Esto llevará consigo la aparición de pixels no clasificados. Si su número es considerable, convendrá retornar a la fase de entrenamiento, con objeto de deducir nuevas categorías o perfeccionar la definición de las ya existentes. El criterio de máxima probabilidad asume que las categorías presentan una distribución normal. Este requisito ha sido comprobado en numerosos estudios, además de que no se han detectado alteraciones notables de los resultados en el caso de distribuciones sesgadas (Swain y Davis, 1978).

Gracias a su solidez estadística, el criterio de máxima probabilidad fue el aplicado a la clasificación de la imagen de Madrid. Se realizaron dos intentos: (i) partiendo de las estadísticas generadas en el entrenamiento supervisado de la imagen (6.8.2.2); y (ii) sobre las obtenidas en el método no supervisado (6.8.2.3).

El primero de estos criterios generó, en un primer intento, una clasificación bien estratificada pero poco exacta, especialmente como consecuencia de la sobrevaloración del componente urbano. Posteriores refinamientos permitieron obtener una clasificación bastante adecuada

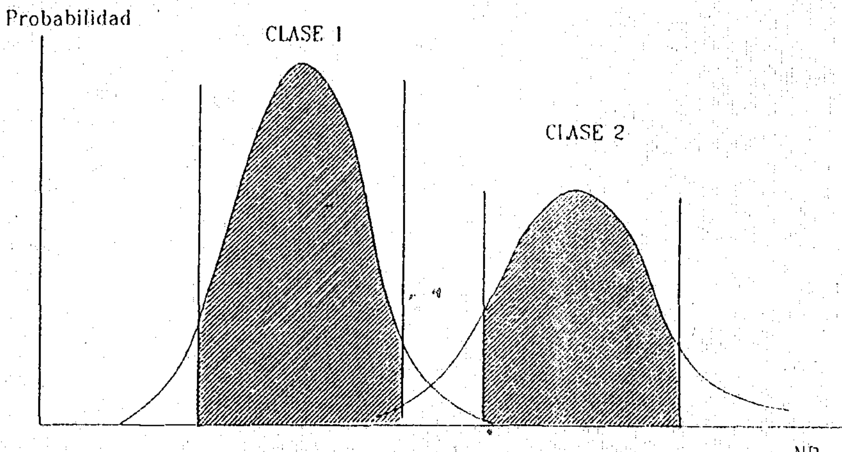


Fig. 6.64 - Efecto de considerar la probabilidad a posteriori

del área de estudio, a partir de las clases previamente seleccionadas (fig. 6.65*). El principal problema surge de las confusiones entre las áreas residenciales y otras cubiertas vegetales. Como ya hemos indicado, estas áreas residenciales son muy heterogénas, con distintos grados de edificación, aunque dominan las construcciones unifamiliares con importante presencia de espacios verdes. Por este motivo, la caracterización espectral de esta cubierta resulta especialmente problemático, ya que presenta, por un lado, una clara heterogeneidad, y por otro una actitud intermedia entre las cubiertas vegetales y los suelos desnudos. En consecuencia, se trata de la categoría más sobredimensionada en la imagen, recogiendo algunos sectores de matorral arbolado en las cercanías del Jarama, y en torno a la carretera de Colmenar. En cualquier caso, la asignación resulta bastante certera en el caso de los sectores más occidentales de Madrid, en donde este tipo de residencia, de elevada calidad, tiene un desarrollo importante. El resto de las categorías se ajustan con bastante precisión al área de estudio, especialmente los caducifolios, espacios verdes, y edificación densa. La gradación entre perennifolios y perennifolios con matorral resulta siempre una fuente de problemas, por cuanto no implica límites claros, sino más bien transiciones muy graduales. En cualquier caso, las cubiertas arboladas -o con matorral denso- aparecen claramente delimitadas en la imagen.

En cuanto al análisis no supervisado, el algoritmo de agrupación automática seleccionó 19 clases finales, de un máximo de 30 previamente fijado. Las estadísticas generadas por este agrupamiento, se introdujeron en el clasificador de mínima distancia, con objeto de introducir todos los pixels de la imagen en uno de los grupos. La interpretación de las categorías deducidas por el programa no resulta siempre sencilla. En el caso de esta imagen (fig. 6.66*), no se han reconocido como grupos espectrales coherentes algunas de las categorías seleccionadas en el análisis supervisado, y, más en concreto, las que tienen que ver con la ocupación urbana. Las áreas residenciales del occidente madrileño se incluyen en grupos de distinta densidad vegetal, en función del grado con el que ésta cubra el suelo. En cualquier caso, se trata de un área confusamente asignada, ya que se pierden los patrones de cobertura presentes en la composición en color. La clasificación no supervisada resulta, sin embargo, más adecuada que la supervisada para discriminar tipos de vegetación, tal y como puede observarse en el Monte del Pardo. Aquí, se marca con bastante claridad la orla de arbolado denso, que se continúa en la Casa de Campo, apareciendo distintos matices en el interior, en donde el pastizal y matorral alternan, en distintos grados de densidad, con el encinar.

Tabla 6.13
Medidas estadísticas para distintas cubiertas

	B2		B3		B4		B7	
	Med	D.T.	Med	D.T.	Med	D.T.	Med	D.T.
AGUA	28	5,0	20	4,5	11	2,5	4	2,4
CEREAL	68	12,2	95	10,1	101	13,4	99	8,3
REGADIO	40	5,8	45	4,5	96	7,3	44	2,9
URBANO	54	6,2	70	4,5	73	10,2	80	11,2

6.8.3.4. Otros criterios de asignación

Se incluyen en este capítulo aquellos criterios de asignación alternativos a los tradicionalmente empleados. Se trata de propuestas de investigación que cuentan con una base teórica muy sólida, pero que aún no se aplican extensivamente.

6.8.3.4.1. Clasificadores en árbol

El clasificador en árbol (*decision tree classifier*) es uno de los más sencillos en su concepción. La idea de fondo consiste en discriminar secuencialmente cada una de las categorías, de acuerdo a la banda o bandas que permiten más claramente su separación del resto.

Un sencillo ejemplo puede aclarar la estructura de este método. En la tabla 6.13 figuran las estadísticas de entrenamiento para una serie de clases de ocupación del suelo. En este caso, el análisis se realiza sobre cuatro bandas del sensor TM: la 2 (verde), 3 (rojo), 4 (infrarrojo cercano) y 7 (infrarrojo medio). A partir de estos valores puede diseñarse un gráfico de dispersión espectral, considerando el rango como la media ± 2 desviaciones típicas. Con ayuda de este gráfico podemos diseñar un árbol de decisiones que nos permita separar las cuatro categorías (fig. 6.67). El primer paso consiste en separar los pixels pertenecientes a la categoría más fácilmente discriminable, el agua. Para ello, se emplea la banda 7, utilizando un umbral superior a 10. Por tanto, los pixels con un ND $\leq$ 10 en esa banda serán etiquetados como clase agua, y extraídos de la imagen para evitar que intervengan en pasos sucesivos. Posteriormente se emplea la banda 3 para discriminar la clase regadío. Con las categorías urbano y cereal el problema se complica, puesto que existe un solape en todas las bandas. Sin embargo, la separación es mayor en las bandas 3 y 4, por lo que se establece una pregunta múltiple: los pixels

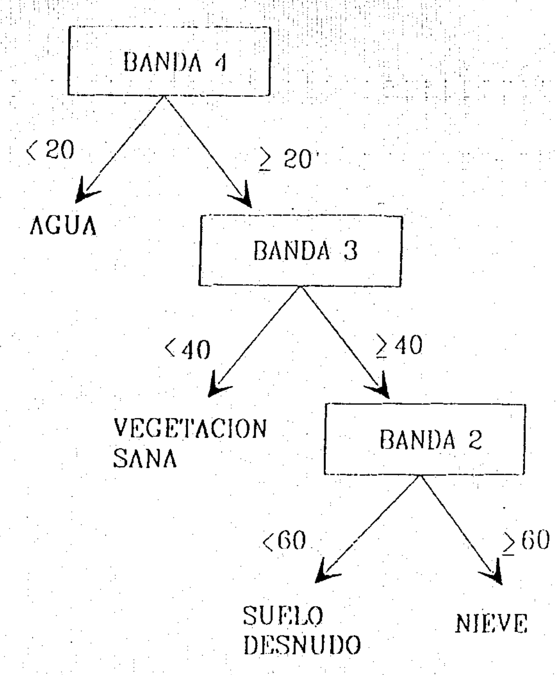


Fig. 6.67 - Ejemplo de clasificación en árbol

con ND ≤ 77 en la banda 3 y ND ≤ 85 en la banda 4 se etiquetan como urbano, mientras los que no cumplen ambas condiciones son clasificados como cereal. Esto reduce el riesgo de error, que podría derivarse del empleo de una sola banda.

Los problemas de clasificación reales son, evidentemente, mucho más complejos. No obstante, esta estrategia de clasificación alberga un futuro muy prometedor: es muy rápida y bastante conectada con las características espectrales de cada cubierta (Itten et al, 1985; Lee y Richards, 1985; Mather, 1987, pp. 309-311).

6.8.3.4.2. Clasificadores de contexto

Una de las variaciones más interesantes en los criterios tradicionales de clasificación es la que considera el contexto espacial en el que se desenvuelve cada pixel. Como hemos tenido ocasión de comprobar a lo largo de las páginas precedentes, el ordenador realiza la asignación

pixels-categorías sobre la base de los ND. En definitiva, la clasificación asistida por ordenador sólo considera una de las claves empleadas por el foto-intérprete: el tono, dejando a un lado otros criterios de gran interés como textura, contigüidad, tamaño, forma, sombreado, etc. Precisamente, los clasificadores de contexto pretenden refinar la estrategia tradicional, introduciendo de alguna forma el criterio de vecindad. Podemos agrupar las aplicaciones realizadas hasta el momento en dos bloques:

(i) Por un lado, aquellas que tienen en cuenta el contexto espacial de cada pixel para realizar su asignación a una categoría. Se trata de intentos de refinar la clasificación de cada pixel sobre la base de lo que ocurre en pixels vecinos. Las posibilidades aquí son muy variadas: considerar la probabilidad de pertenencia de los pixels contiguos en el clasificador de máxima probabilidad (Danjoy y Sadowski, 1978); incluir una banda textural en la clasificación (Strahler y Logan, 1978; Gordon y Philipson, 1986), o clasificar, en lugar de pixels aislados, áreas espectrales homogéneas (Hoffer y Swain, 1980).

(ii) Por otra parte, podemos considerar a aquellos trabajos que emplean el criterio de vecindad para refinar los resultados de la clasificación. En este sentido la contigüidad espacial se aplica como un filtro posterior a la fase de asignación, que tiene por objeto formar áreas temáticas más homogéneas prescindiendo de aquellos pixels aislados que complican innecesariamente los resultados (Campbell, 1987; Thomas, 1980). Estos serán comentados en el capítulo siguiente, dentro de las técnicas aplicadas a posteriori de la clasificación.

Dentro del primer grupo de clasificadores de contexto, se situaría el denominado ECHO (*Extraction and Classification of Homogeneous Objects*, Ketting y Landgrebe, 1975). Se pretende clasificar una imagen en áreas compuestas por pixels de similares características, antes de que éstos sean asignados a categorías. Posteriormente, la clasificación se realiza sobre estas áreas, en lugar de sobre pixels aislados. La delimitación de esas áreas homogéneas se basa en los criterios de similitud espectral y contigüidad. Tras localizar un pequeño grupo de pixels con ND similares, el algoritmo va incorporando progresivamente pixels vecinos, siempre que estén dentro de un criterio de homogeneidad señalado por el usuario (por ejemplo, a menos de una determinada distancia espectral). Cuando los pixels vecinos no son suficientemente homogéneos se detecta una frontera o un área pequeña de distinta ocupación (isla). Estas zonas se clasifican posteriormente de acuerdo a los criterios tradicionales, antes comentados. El proceso de crecimiento de las áreas continúa hasta que topan con áreas muy contrastadas, con lo que el proceso se detiene. En este punto, la imagen aparecerá segmentada en áreas homogéneas, aunque éstas aún no se hayan asignado a ninguna

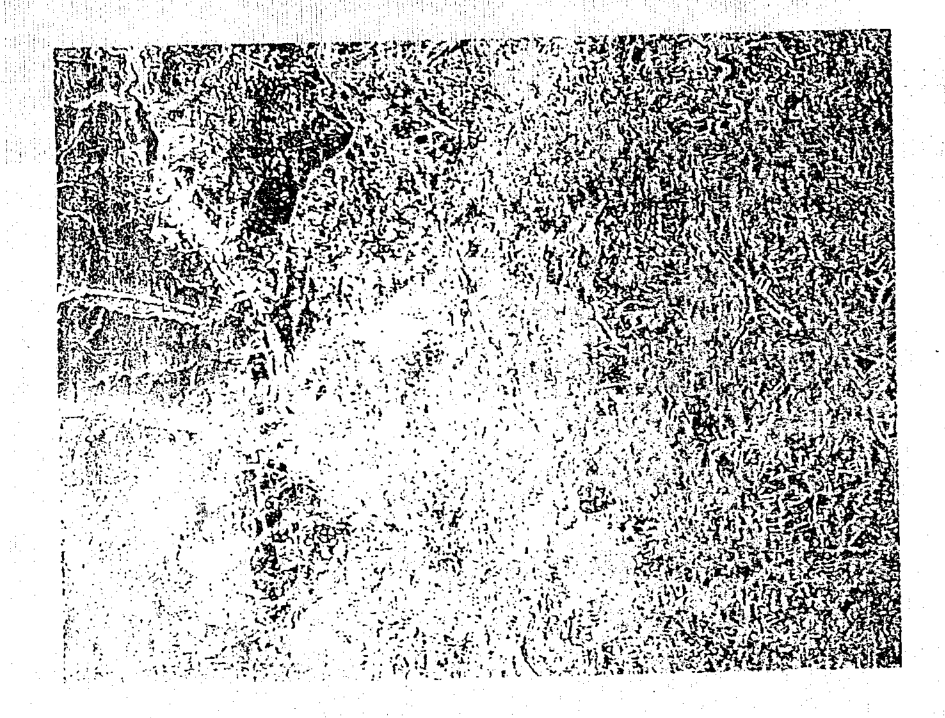


Fig. 6.68 - Imagen de textura a partir de la banda 2

categoría temática. Esta asignación se realiza calculando las estadísticas elementales de los pixels incluidos en cada área, y aplicando sobre ellas uno de los criterios de asignación antes comentados. En ese punto, no serán asignados pixels individuales sino las áreas completas, por lo que la posibilidad de error tiende a reducirse considerablemente (Hoffer y Swain, 1980; Campbell, 1987).

Asimismo de gran interés resultan las distintas medidas de textura como información auxiliar en la clasificación. Como ya vimos en el epígrafe dedicado a análisis visual (5.2.3), la textura hace referencia al contraste espacial entre los pixels de la imagen. En términos numéricos esa variación espacial puede valorarse empleando alguna de las medidas estadísticas de dispersión -desviación típica, suma de las diferencias absolutas- sobre una ventana de 3 x 3 pixels. De forma similar a las técnicas de filtraje, esa ventana se va moviendo a lo largo de la imagen, aplicándose el valor calculado al pixel central. Cuanto mayor sea este valor, tanto más intenso el contraste espacial en la ventana considerada,

lo que indica una textura rugosa[6]. Este método se ha aplicado en el inventario forestal, como indicador de la densidad y homogeneidad de especies, lográndose significativas mejoras en la clasificación (Strahler y Logan, 1978; Strahler, 1984). Gracias también a estas medidas de textura ha sido posible discriminar entre frutales de regadío y caducifolias, empleando el método de diferencias absolutas sobre las bandas TM3 y TM4 (Gordon y Philipson, 1986). En el campo de las aplicaciones urbanas, estas medidas se han revelado de gran interés, especialmente en la cartografía de áreas suburbanas (Jensen, 1979; Jensen et al, 1983).

El cálculo de textura sobre la imagen de Madrid ofrece un resultado bastante confuso (fig. 6.68). La principal explicación de este hecho, hemos de buscarla en el gran contraste espacial que ofrece la imagen, con múltiples fronteras y cambios de cobertura en espacios vecinos. En otras palabras, se trata de una imagen muy rugosa, por lo que la mayor parte de la superficie aparece con tonos claros. Unicamente el Monte del Pardo presenta una mayor homogeneidad espacial, sólo interrumpida por los caminos internos y los bordes del embalse.

6.8.3.4.3. Empleo de información auxiliar

El empleo del ordenador electrónico como instrumento de depósito y proceso de la información espacial, ha provocado una creciente tendencia a la integración, a combinar distintas variables sobre el mismo territorio con vistas a una evaluación integrada del paisaje. Más adelante repasaremos esta tendencia en el contexto de los Sistemas de Información Geográfica (capítulo 8), en donde la teledetección espacial tiene su continuidad más lógica. Aquí nos interesa recalcar el interés de contar con información auxiliar con vistas exclusivamente a mejorar los resultados de la clasificación.

Como se comentó anteriormente, la asignación de los pixels de la imagen sobre la única información de sus ND resulta, en ocasiones, muy compleja. Una alternativa para solventar estos problemas sería acudir a imágenes adquiridas en otra fecha, con lo que se completaría la información espectral con una dimensión temporal. Otra opción pasa por emplear otro tipo de datos, no necesariamente adquiridos por sensores espaciales. Por ejemplo, para clasificar olivares y viñedo resulta conveniente contar con información sobre el tipo de suelos en que se asientan, pues éstos serán un elemento clave en la señal detectada por el

[6] Medidas alternativas de la textura pueden analizarse en Haralick et al (1973), Harris (1987, pp. 96-99), Jensen (1986, pp. 169-173), y Mather (1987, pp. 312-317).

sensor. En el caso de las coníferas, su situación topográfica puede ser crucial para distinguir distintas especies, difícilmente discriminables sólo sobre la información espectral que proporciona el sensor.

A juicio de Hutchinson (1982), la información auxiliar puede beneficiar a la clasificación en varias formas:

(i) Para estratificar la imagen, previamente a la clasificación, de acuerdo a rasgos fisiográficos homogéneos. Esto permite reducir la varianza espectral de las distintas categorías que pretenden discriminarse (Arbiol et al, 1985; Núñez et al, 1983).

(ii) Para introducir nuevas variables en la clasificación, combinando las bandas originales, con modelos digitales del terreno o cartografía convencional digitizada (Cosentino et al, 1981; Strahler y Logan, 1978).

(iii) Para re-clasificar algunas categorías en caso de que no sean discriminables solo a partir de información espectral (Hutchinson, 1982).

Entre los trabajos más interesantes en este sentido, se encuentra el método para la realización de inventarios forestales que desarrollaron varios profesores de la Universidad de California, Santa Barbara (Strahler y Logan, 1978; Franklin et al, 1986). Este método, aplicado a varios bosques nacionales de California, combinaba el tratamiento digital de imágenes Landsat con modelos digitales del terreno e información de campo. A partir de las imágenes se elaboraron algunos índices de textura, incorporados a la clasificación junto a las bandas originales. Asimismo, se empleó un modelo digital del terreno, sobre el que se obtuvo la altitud, pendiente y orientación, lo que permitió refinar notablemente la discriminación tanto de especies, como de densidades y alturas. Trabajos similares se han desarrollado por otros autores (Miller y Williams, 1978; Wu, 1980).

6.8.3.4.4. Clasificación multi-temporal

Como ya abordamos en el capítulo de análisis visual (5.2.5 y 5.3.5), la dimensión temporal puede resultar clave en la interpretación de imágenes. Siguiendo la terminología allí señalada, podemos dividir las aplicaciones multi-temporales en dos grupos: (i) estudios multi-anuales, empeñados en la detección del cambio entre dos fechas de referencia, y (ii) estudios multi-estacionales, en donde se utilizan imágenes de distintas fechas para enriquecer la información espectral, aportando un componente fenológico muy interesante en cubiertas vegetales.

En lo que se refiere a estudios multi-anuales, la mayor parte de los trabajos de clasificación digital abordan cada imagen independientemente, para luego detectar los cambios por comparación de las clasificaciones obtenidas en las distintas fechas. Son menos frecuentes aquellos que clasifican, en conjunto, todas las bandas originales de las distintas fechas. En breves términos, los métodos de detección de cambios se basan en las siguiente técnicas:

(i) sustraer, pixel a pixel, los ND de las dos imágenes originales, para luego indicar umbrales de cambio entre ellas (Schowengerdt, 1983, pp. 68-71);

(ii) realizar un cociente entre los mismos valores (Howarth y Wickware, 1981; Mussakowski, 1985);

(iii) aplicar la técnica de componentes principales, seleccionando los componentes menos importantes, al indicar áreas poco comunes a ambas fechas (Byrne et al, 1980), y

(iv) sustraer, pixel a pixel, las dos imágenes clasificadas (Hall et al, 1984; Jensen, 1986, cap. 9).

En los estudios multi-estacionales es mucho más frecuente que se combinen dos o más imágenes, como paso previo a la clasificación. Varios autores han demostrado que este enfoque proporciona mejores resultados que el análisis mono-temporal (Girard, 1981; Mergerson, 1981). No obstante, también ofrece importantes problemas, por cuanto -si quieren combinarse pixel a pixel- es necesario que las imágenes presenten homogeneidad radiométrica y ajuste geométrico.

Si se trabaja con imágenes adquiridas en distinta estación, lo habitual será que presenten condiciones de iluminación muy variadas: la altura del sol sobre el horizonte es menor en invierno, con el consiguiente aumento del efecto de sombras. También pueden producirse variaciones en la calibración de los sensores o en el efecto de dispersión atmosférica. Estos problemas tienden a corregirse mediante muestras tomadas sobre áreas poco afectadas por cambios estacionales (aeropuertos, parcelas sobre suelos desnudos, o aguas profundas). A partir de una fecha de referencia, el resto de imágenes pueden equiparse a ésta mediante regresión lineal sobre los ND de esas zonas de muestra (Bronsveid y Luderus, 1982); Jensen et al, 1983; Lo et al, 1986; López y Caselles, 1989).

La exactitud geométrica resulta el factor más complejo. Se requiere que las imágenes a clasificar conjuntamente estén registradas con elevada precisión. De lo contrario, el clasificador estará considerando un ND que no es propio del pixel que pretende asignar, sino de alguno de los vecinos, con lo que la exactitud final resulta seriamente comprometida (Gordon, 1980; Nelson y Grebowsky, 1982). Normalmente, son necesarias ecuaciones de ajuste de segundo o tercer grado para lograr estos niveles

de detalle, sobre la base de haber localizado con gran detalle los puntos de control (6.5.3).

En cuanto al tercer problema arriba apuntado, el incremento en el volumen de datos a manipular, suele abordarse con alguna técnica de depuración previa de datos. No hay que olvidar que el tiempo de clasificación está en relación directa con el número de bandas empleada en ella (considerando, como es lógico, los recursos informáticos constantes). En el caso de estudios con varias imágenes, suelen emplearse técnicas para sintetizar el conjunto de bandas originales en un menor número de variables. El empleo de componentes principales, análisis canónico o discriminante suele ser común en este contexto (Byrne et al, 1980; Wastenson et al, 1981; Lo et al, 1986).

Por último, resulta crucial elegir convenientemente las fechas de referencia, con objeto de evitar redundancias o confusiones. Más arriba se estudió este aspecto (5.2.5), que explica en buena media la calidad final de los estudios multi-temporales. En nuestro trabajo sobre la comarca de San Martín de Valdeiglesias, los mejores resultados se obtuvieron a partir de las imágenes de julio y octubre; superiores incluso a la clasificación de cuatro estaciones, donde los problemas de ajuste se pusieron más en evidencia (Chuvieco, 1985a).

6.9. OBTENCIÓN Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Independientemente del método empleado en la clasificación digital, los resultados se almacenan en una nueva imagen, similar a las originales, en cuanto a estructura y tamaño, pero con la importante diferencia de que el ND de cada pixel no corresponde a un valor de reflectividad, sino a la categoría a la que se asignó. En definitiva, obtenemos una nueva matriz numérica, similar a la original aunque de dos dimensiones, pues se ha condensado la información espectral (varias bandas) en una sola clase temática. Esa nueva imagen puede ser el producto final del trabajo, o servir como estadio intermedio de un proyecto más amplio, en donde la teledetección se combine con otro tipo de variables espaciales (cap. 8).

Esa nueva imagen puede dar lugar a dos tipos de productos: cartográficos y estadísticos. En el primer caso, se trata de convertir la imagen clasificada en un mapa; en el segundo, de realizar un inventario a partir de los ND que componen esa imagen.

6.9.1. Productos cartográficos

6.9.1.1. Corrección cartográfica de la imagen

La imagen clasificada puede convertirse en un mapa temático, similar a los convencionales, empleando algunas técnicas ya comentadas en anteriores capítulos.

En primer lugar, se requiere dotar a esa imagen de una validez cartográfica, de tal forma que se ajuste a un sistema de coordenadas determinado. Por cuanto el resultado de la clasificación es también una imagen digital, pueden aplicarse sobre ella los métodos de corrección geométrica antes comentados (6.5.3). Basta identificar puntos comunes entre la imagen y el mapa de referencia, aplicar algún polinomio de transformación, y proceder al trasvase de los ND a su nueva posición. Como ya se indicó, este trasvase debe realizarse con el criterio del vecino más próximo, puesto que cualquier otro -que suponga alguna operación de promedio- invalidará los resultados de la clasificación. Gracias a esta restitución digital, se facilita un procedimiento rápido y económico de convertir un imagen interpretada en un mapa convencional.

En el caso de la imagen de Madrid, la corrección geométrica de las imágenes clasificadas se abordó con el mismo procedimiento de las originales, tanto en lo que se refiere a los puntos de control, como a la función de ajuste. Se empleó el método del vecino más próximo para trasvasar los ND a la nueva posición, reduciendo el tamaño del pixel a 50 x 50 m para facilitar el ajuste a la malla UTM.

Caso de que hubiéramos optado por la interpretación visual de la imagen, la transformación equivalente habría supuesto restituir las líneas que definen las categorías a un mapa base, con ayuda de pantógrafos o restituidores ópticos. En cualquier caso, supone una operación lenta y tediosa, que puede fácilmente suscitar errores geométricos.

6.9.1.2. Formación de una tabla de color

La visualización de la imagen clasificada requiere una CLUT especial, que refleje adecuadamente el significado temático de cada una de las categorías. En este sentido, conviene respetar las convenciones establecidas en la asignación temática de colores: por ejemplo, rojo para las zonas urbanas, verde para las forestales, ocre para las agrícolas, etc. (Anderson et al, 1976; Coleman et al, 1968).

Tabla 6.14
Colores asignados a la clasificación supervisada de la imagen de Madrid

Clase	Color	Rojo	Verde	Azul
Caducifolios	Verde Claro	0	255	0
Perennifolios (densidad baja)	Verde oliva	101	30	70
Perennifolios (densidad alta)	Verde oscuro	0	90	0
Pastizal	Ocre	248	165	0
Matorral	Salmón	240	185	130
Suelos desnudos	Amarillo	255	255	0
Edificación compacta	Rojo	255	0	0
Edificación exenta	Violeta	115	0	150
Áreas residenciales	Magenta	255	0	255
Infraestructura	Gris	127	127	127
Cultivos regados	Cian	0	255	255
Espacios verdes	Verde azulado	0	255	127
Agua	Azul	0	0	255

Como ya se comentó, la manipulación numérica del color ofrece al intérprete una amplia paleta de colores: de 0 a 255 niveles, por cada uno de los tres cañones de color. De esta forma, para diseñar un color apropiado a cada categoría, basta indicar tres valores numéricos, entre 0 y 255, que expresen el nivel de rojo, verde y azul, asignado a dicha clase. En clasificaciones temáticas, bastan quince o veinte colores, bien discriminables entre si, para visualizar el resultado. Un mayor número de categorías complicaría notablemente la interpretación y, en consecuencia, la legibilidad del documento final.

En la representación visual de las imágenes clasificadas que venimos comentando, se han empleado los colores recogidos en la paleta estándar del sistema. Para el caso de la clasificación supervisada, los colores seleccionados aparecen en la tabla 6.14.

Basta añadir al mapa un conjunto gráfico apropiado para que se culmine el proceso de edición, sin mediar la delineación humana. Elementos de interés, en este sentido son: una leyenda de color, que identifique las categorías presentes en el mapa y el color que se les asigna; una escala gráfica, para identificar adecuadamente la proporción

del área representada, y una serie de rótulos identificativos de la zona y/o del proceso realizado (fig. 6.65* y 6.66*).

6.9.1.3. Suavización de los resultados

Resulta bastante frecuente que los resultados de una clasificación digital adolezcan de una excesiva fragmentación. En otras palabras, las diversas categorías se imbrican entre sí, en una compleja sucesión espacial. Manchas de color, más o menos homogéneas, se encuentran salpicadas por pixels asignados a otras categorías, perdiéndose su unidad geográfica y dificultando la interpretación de los resultados. Este suceso se denomina coloquialmente, en la bibliografía anglosajona, "efecto de sal y pimienta" (*salt and pepper*), y se debe a una doble causa: (i) por un lado, a que la mayor parte de los criterios de asignación no tienen en cuenta la pertenencia de pixels vecinos; (ii) por otro, a la propia complejidad del paisaje, directamente relacionada con la aparición de pixels de borde -fronterizos a dos o más categorías- que son los principales responsables de la discontinuidad visible en el mapa.

Para solventar este problema, suele aplicarse una técnica de suavización de resultados, similar en la concepción, aunque no en la ejecución, a los filtros de paso bajo. Sobre la imagen clasificada no puede aplicarse un filtro convencional, puesto que cualquier promedio de pixels vecinos introduciría cambios imprevisibles en la clasificación. En otras palabras, no se trata de una imagen de tono continuo, sino de una imagen categorizada, en donde no tiene sentido establecer análisis de gradientes. Por esta razón, se aplican sobre la imagen esquemas de filtraje originales, basados sobre medidas categóricas en lugar de promedios (Thomas, 1980).

El objetivo último es reasignar aquellos pixels aislados o poco significativos, facilitando una distribución espacial más nítida de las distintas categorías. Para ello, se procede a comparar la clase asignada a cada pixel con la que ofrecen los pixels vecinos. Si esa clase es similar a los pixels del entorno, se mantiene la asignación original; caso contrario, se modifica. Normalmente esta comparación se realiza a partir de una ventana móvil de 3 x 3 pixels, si bien la técnica es independiente de su tamaño. En la terminología habitual se distinguen, a este respecto, dos tipos de filtro:

(i) Filtro modal, en el cual, el pixel situado en el centro de la matriz se asigna a la categoría más frecuente entre los pixels vecinos, siempre que, lógicamente, no pertenezca ya a ella (fig. 6.69).

(ii) Filtro de mayoría. El pixel central se asigna a la categoría que cuente con la mitad más uno de los pixels vecinos. En caso de que ningu-

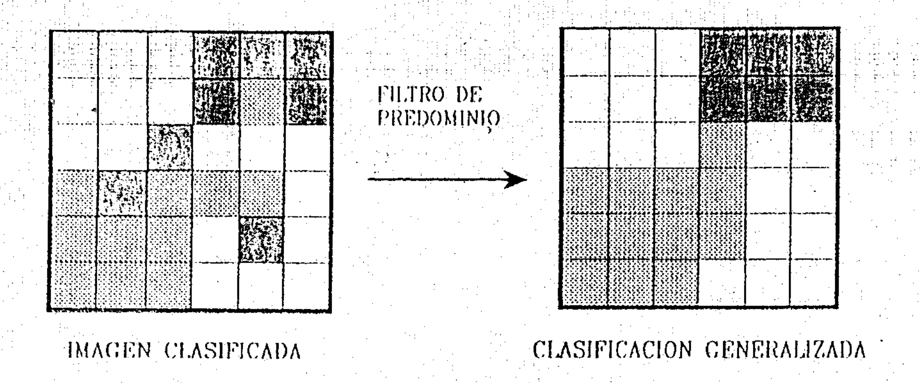


Fig. 6.69 - Filtros para el suavizado de las clasificaciones

na categoría rebase ese valor, el pixel central mantiene su asignación primitiva.

La elección entre uno u otro método depende del tipo de paisaje analizado y del algoritmo que se haya empleado en la clasificación. Lógicamente, el primero ofrece una mayor generalización que el segundo, por lo que puede ser conveniente su empleo en caso de paisajes muy complejos y cuando la escala de trabajo sea media o pequeña.

Se ha comprobado por diversos autores, que la aplicación de esta técnica proporciona un aumento significativo de la exactitud conseguida en la clasificación (Booth y Oldfield, 1989). Este efecto es debido, principalmente, a la eliminación de asignaciones anómalas debidas a pixels de borde.

El impacto de la transformación puede ilustrarse en la figura 6.70*, que recoge un fragmento de la clasificación de la imagen de Madrid, y el resultado de aplicar sobre ella un filtro modal. Como puede observarse, la consecuencia de este proceso es la aparición de manchas de color más homogéneas, eliminando asignaciones poco significativas en la clasificación original.

6.9.1.4. Reproducción de la imagen clasificada

Una vez que el resultado es satisfactorio, el último paso se dirige hacia la reproducción de la imagen clasificada en un soporte permanente, ya sea papel o película.

En el epígrafe dedicado a los componentes físicos del tratamiento de imágenes (6.3.1.3), se hizo referencia a los distintos medios para obtener esta salida gráfica. En función de las disponibilidades de equipo, puede obtenerse un resultado de gran calidad, que haga practicamente innecesarios los medios convencionales en la reproducción del documento. Desde las fotografías de pantalla y el empleo de impresoras de inyección de tinta hasta los restituidores láser, el rango de opciones es muy amplio (López Vizoso, 1989, pp. 300-323). En cualquier caso, basta concluir que existen los medios técnicos posibles para que la teledetección digital complete toda la fase del proceso de formación y edición cartográfica: desde los datos de partida, hasta la reproducción final del mapa.

6.9.2. Productos estadísticos

Una de las principales ventajas de la clasificación asistida por ordenador es ofrecer un producto digital. Como ya hemos visto, la imagen clasificada es una matriz numérica en la cual el ND de cada pixel indica la categoría a la que éste pertenece.

Tabla 6.15
Inventario de la ocupación del suelo en la imagen de Madrid

	Número de Pixels	Hectáreas
Caducifolios	3.997	359,73
Perennifolios (densidad baja)	225.743	20.316,87
Perennifolios (densidad alta)	36.081	3.247,29
Pastizal	39.748	3.577,32
Matorral	70.368	6.333,12
Suelos desnudos	48.116	4.330,44
Edificación compacta	45.886	4.129,74
Edificación exenta	209.770	18.879,30
Areas residenciales	189.934	17.094,06
Infraestructura	22.806	2.052,54
Cultivos regados	1.169	105,21
Espacios verdes	4.081	367,29
Agua	2.301	207,09

Una simple tabulación de frecuencias permite obtener el inventario del área clasificada; esto es, el número de pixels incluidos en cada una de las categorías. Puesto que es conocida la dimensión superficial de cada pixel, resulta inmediato obtener la extensión ocupada por cada categoría. Por el contrario, el análisis visual requiere, para alcanzar el mismo objetivo, planimetrar cada una de las zonas delimitadas por el intérprete, lo que resulta una labor lenta, fatigosa y, frecuentemente, inexacta.

En el caso del tratamiento digital, este cómputo de frecuencias puede realizarse sobre toda la imagen, o sobre polígonos determinados. Si esos polígonos coinciden con unidades administrativas (municipios, comarcas), puede obtenerse un inventario de gran interés para las estadísticas oficiales. Por ejemplo, una clasificación agronómica de la imagen puede facilitar estadísticas de cultivo a veces inaccesibles por medios convencionales. Varios trabajos han ensayado el uso alternativo de esta metodología frente a las fuentes de información tradicionales, como el catastro o las hojas de cultivos (GDTA-CEE, 1982; Chuvieco, 1985c).

La tabla 6.15 recoge el inventario de los tipos de ocupación de la imagen de Madrid, tal y como aparecen clasificados en la figura 6.66*. Cuando esta valoración cuantitativa sea el objetivo más acuciante del trabajo, el recurso al análisis digital resulta poco menos que obligado.

7. VERIFICACIÓN DE RESULTADOS

El producto final de una clasificación, ya sea ésta visual o digital, es un mapa temático, en donde el territorio de estudio se encuentra dividido en una serie de unidades espaciales, de significado coherente con la leyenda de trabajo. Ese documento puede integrarse con otras variables geográficas, para análisis posteriores, o servir como punto final del proyecto.

En uno y otro caso, habitualmente se asume que el documento obtenido es completamente fiable. Dicho de otro modo, se considera que la cartografía realizada se ajusta perfectamente a la realidad. Tal asunción es, casi siempre, gratuita. Toda clasificación lleva aparejada un cierto margen error, en función de la calidad de los datos o de la rigurosidad del método empleado. Por ello, resulta obligado aplicar algún procedimiento de verificación, que permita cuantificar ese error y, en función de él, valorar la calidad final del trabajo y su aplicabilidad operativa.

Los métodos de verificación estadística se han desarrollado, en los últimos años, en el contexto del tratamiento digital de imágenes espaciales. Esto no quiere decir que sólo sean aplicables a este método de interpretación, puesto que pueden generalizarse a cualquier tipo de cartografía temática, sea digital o no, a partir de la teledetección espacial o de imágenes aéreas. Mas aún, cualquier documento temático debería incluir este proceso, pues ofrece un claro indicador de sus posibilidades reales de aplicación.

7.1. FUENTES DE ERROR EN UNA CLASIFICACIÓN TEMÁTICA

La fiabilidad de un mapa temático depende, principalmente, de la metodología adoptada y de la calidad de los datos sobre los que se aplica. La interpretación visual implica un mayor grado de supervisión que el

tratamiento digital de imágenes, y se realiza, normalmente, a menor escala, lo que supone manejar una leyenda menos detallada. La exactitud de uno y otro método también está influida por los recursos externos aplicados sobre la interpretación, como es el caso de la experiencia del intérprete o de la calidad del equipo de tratamiento con que se cuente.

En suma, podemos agrupar los factores de fiabilidad, o si se prefiere las fuentes de error, de una clasificación en varios grupos, en razón del elemento principal con que se relacionan. De esta forma se distinguen los siguientes tipos de errores: (i) relacionados con el terreno que se analiza, (ii) con el nivel de precisión requerido en la leyenda, (iii) con la adquisición de la imagen, y (iv) con factores medio-ambientales externos (Campbell, 1987; Chuvieco, 1985b; Link y Struve, 1978):

7.1.1. Estructura del territorio

Los errores relacionados con la estructura del territorio, incluyen aquellas confusiones derivadas de la disposición espacial con que se presentan las cubiertas objeto de estudio. Aquí pueden incluirse aspectos como la forma, orientación y, sobre todo, tamaño de las parcelas; también el contraste espacial entre cubiertas vecinas, y el grado de mezcla en los distintos tipos de cubierta.

El efecto de la morfología parcelaria, resulta especialmente sensible en aquellas regiones que han sufrido una ocupación milenaria del territorio. Esto origina, con bastante frecuencia, solares de muy pequeña extensión, inferior incluso al tamaño del pixel. Como consecuencia, el sensor detecta una señal radiométrica promedio entre dos o más cubiertas, haciendo prácticamente imposible su discriminación (fig. 7.1). El efecto, conocido como error de frontera, es muy habitual en aplicaciones agrícolas, especialmente en los espacios de larga tradición histórica, como es el caso de la cuenca mediterránea.

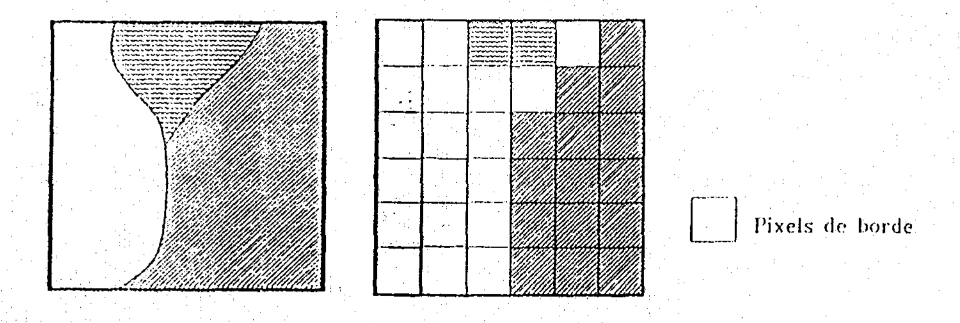


Fig. 7.1 - Consecuencias del error de frontera

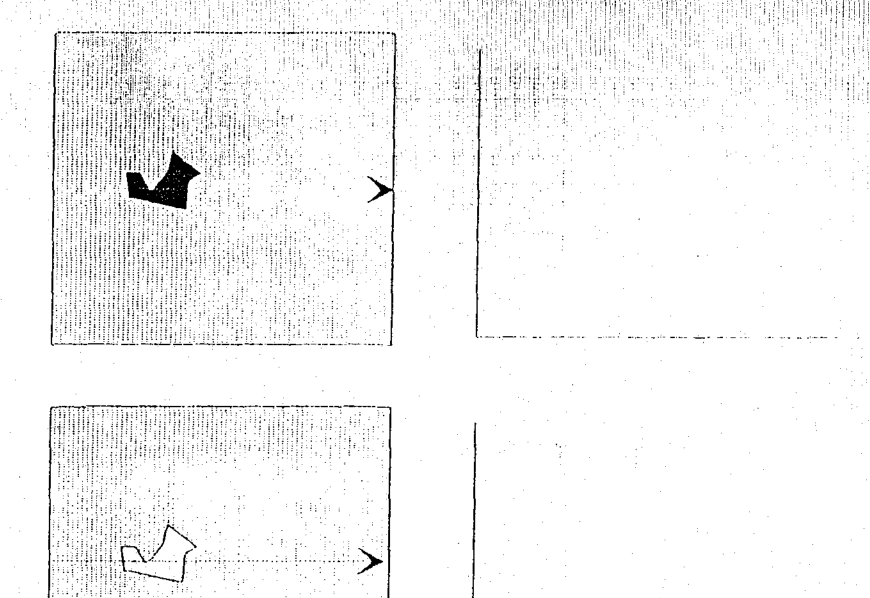


Fig. 7.2 - Efecto del contraste radiométrico entre cubiertas vecinas

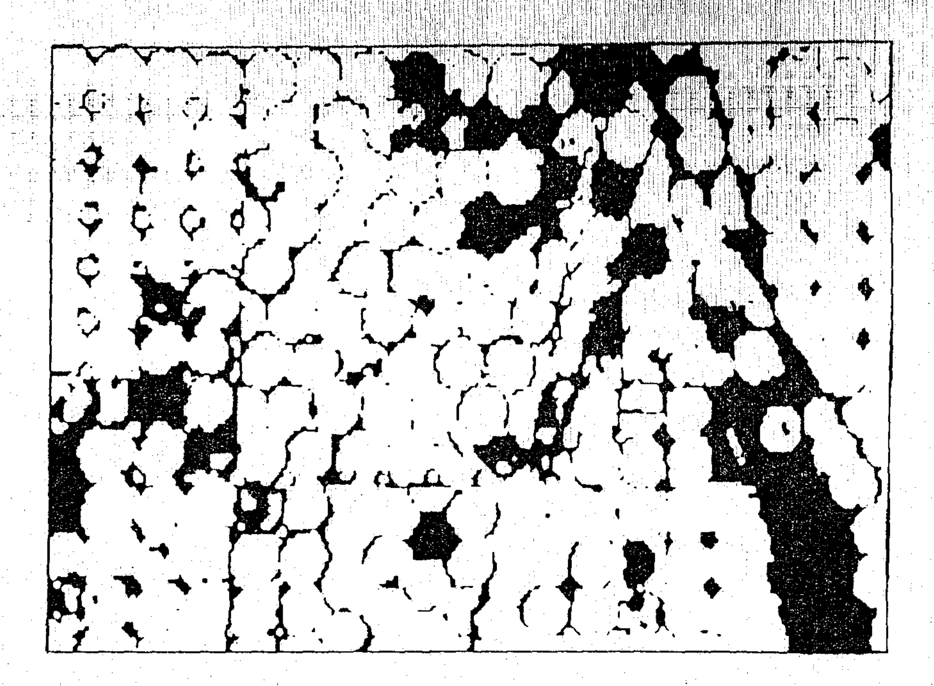
Estrechamente conectado con este problema, se encuentra el efecto de la disposición espacial de los tipos de cubierta. Si existe un claro contraste espectral entre cubiertas vecinas, éstas serán más fácilmente separables que si ofrecen un comportamiento similar, ya que el sensor, al cambiar de una a otra, podrá detectar una señal suficientemente discrepante para interpretarla como perteneciente a una cubierta distinta (fig. 7.2). Por ejemplo, un núcleo rural rodeado de cultivos en regadío, resulta más fácilmente discriminable que si se enmarca en un sector cerealista de secano, ya que esta cubierta cuenta con una respuesta más similar a los núcleos rurales, especialmente cuando se trabaja con imágenes estivales (Chuvieco, 1985c).

En cuanto al grado de mezcla entre cubiertas, puede afirmarse que supone un problema casi insoluble, al menos cuando se aborda el trabajo sólo a partir del valor radiométrico de cada pixel. Otros criterios más abstractos, como estructura, textura o asociación, comunes en análisis visual, pueden paliar ese problema, si bien la distinción de rasgos de tamaño inferior al del pixel sólo puede realizarse por aproximación. Este efecto aparece, con mayor énfasis, en cubiertas agrícolas cuando se produce asociación de cultivos en la misma parcela. En el caso de categorías forestales, implica la combinación entre diversas especies de árboles, y de éstas con matorral y pastizales.

La influencia del tipo de paisaje en los errores de la clasificación se ha puesto en evidencia al estudiar la distribución espacial de los patrones de error. Estos trabajos han demostrado que existe una auto-correlación espacial significativa entre los pixels mal clasificados. Dicho de otra forma, la aparición de un pixel erróneo está estrechamente relacionada con su ubicación espacial, ya que los errores están notablemente influidos por la estructura del territorio. Esa tendencia a la formación de áreas de error es más clara en aquellas imágenes que muestran menor complejidad espacial; esto es, con patrones de distribución más sistemáticos, como ocurre en el caso de las áreas agrícolas (fig. 7.3). El error de frontera resulta crucial en ese sentido, pues aparecen más pixels de borde precisamente en los paisajes más complejos, como son las áreas urbanas o los espacios de vegetación natural mixta (Congalton, 1988a).

7.1.2. Nivel de desagregación

Los errores relacionados con el nivel de desagregación de la leyenda son, en última instancia, fruto de una inadecuada selección de la misma, o de las imágenes más apropiadas para su consecución (4.1). En la mayor parte de los casos, el intento de establecer subdivisiones en una clase temática implica problemas de asignación, puesto que se pretenden discriminar cubiertas muy similares espectralmente. Por ejemplo, en un estudio sobre el Sur de Alemania, se comprobó cómo la combinación de las clases "baja densidad urbana" y "alta densidad urbana" en una clase común "urbana", aumentó la precisión de la cartografía final en un 83 %, mientras la inclusión de bosque, en lugar de bosque caducifolio y perennifolio incrementó la precisión a un 88 % (Schneider, 1980). Similares conclusiones se han extraido por otros autores, en el intento de establecer distintas densidades de edificación en zonas urbanas (Toll, 1984).



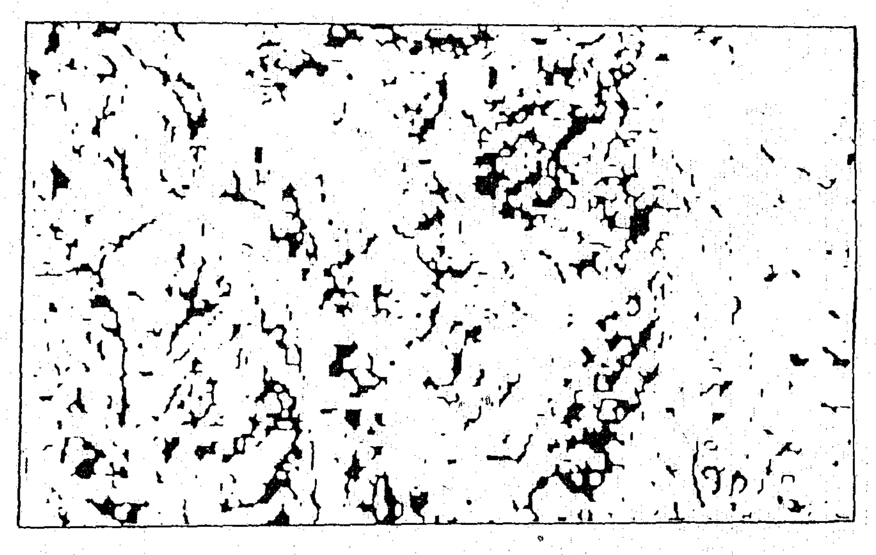


Fig. 7.3 - Distribución espacial del error en las clasificaciones digitales. En la parte superior aparece una imagen correspondiente a una zona agrícola; en la inferior a un área forestal (Tomado de Congalton, 1984. Reproducida con permiso)

Este tipo de errores pueden comprobarse, con cierta facilidad, tras estudiar las confusiones más notorias detectadas en la clasificación. Caso de que exista una importante mezcla entre sub-clases, convendrá optar por categorías más generales, por métodos de interpretación más depurados, o por información auxiliar, que complete la disponible por el intérprete.

7.1.3. Adquisición de la imagen

Los errores relacionados con la adquisición de la imagen ya se han analizado en anteriores capítulos (6.5.1). Hacen mención a problemas en el funcionamiento del sensor o de la plataforma, a la influencia atmosférica, o a fallos en los sistemas de recepción y/o grabación de la imagen.

En sentido amplio, podríamos incluir aquí también las confusiones derivadas de una incorrecta selección de la imagen. En el caso de las cubiertas vegetales, resulta muy conviene considerar su dinamismo estacional, de cara a establecer el periodo más apropiado para abordar su discriminación. Si la imagen se adquiere en una fecha inadecuada, pueden aparecer errores de asignación, de otro modo solventables. Por ejemplo, en imágenes de verano, pueden presentarse problemas para discriminar, digitalmente, núcleos rurales y parcelas cerealistas recien cosechadas. El problema se deriva de su comportamiento espectral, muy cercano en esas fechas, puesto que los tejados de estos núcleos suelen fabricarse con el mismo material del suelo agrícola. Evidentemente, esta confusión puede obviarse utilizando imágenes de primavera, cuando estos campos aparecen cultivados y, por tanto, con un comportamiento muy distinto de las zonas edificadas.

En otro tipo de cubiertas, esta discriminación resulta mucho más problemática, por cuanto sus componentes básicos son muy similares. El ejemplo más típico sería la confusión entre áreas residenciales y bosques caducifolios. Su comportamiento espectral resulta bastante parejo a lo largo del año, ya que la cubierta arbolada (similar en ambas categorías) es la más influyente en la generación de la señal detectada por el sensor. En este sentido, se evidencia la necesidad de contar con otros criterios de interpretación, más allá del valor radiométrico (5.2).

7.1.4. Condiciones medio-ambientales

Por último, podemos señalar un grupo de errores de asignación debidos a las condiciones medio-ambientales. Como ya hemos visto, la

distinta orientación, pendiente, densidad y estado fenológico con que aparece una cubierta, implica una variabilidad espectral en torno al comportamiento tipo de esa categoría. Tal dispersión dificulta la caracterización espectral de una clase, provocando solapes y confusiones con categorías vecinas.

7.2. MEDIDAS DE LA FIABILIDAD

La estimación de la exactitud alcanzada por el mapa puede realizarse por diversos criterios: (i) comparando el inventario de la clasificación con el obtenido por otras fuentes convencionales; (ii) estudiando la fiabilidad obtenidas al clasificar las áreas de entrenamiento, y (iii) seleccionando unas áreas de verificación para las que se cuenta con la cubierta realmente presente en el suelo (fig. 7.4).

El método más sencillo para estimar la precisión conseguida por una mapa, se basa en calcular las diferencias entre el inventario ofrecido por la clasificación y por otras fuentes que se consideren fiables (estadísticas oficiales, cartografía de detalle, etc). Suponiendo al documento de referencia como plenamente fiable, esta medida sólo indica el porcentaje de error, pero no su localización sobre el mapa. Por otro lado, tampoco identifica las confusiones entre categorías que producen ese margen de error, además de que no siempre resulta sencillo ajustar la leyenda de la fuente convencional con la obtenida a partir de imágenes de satélite (GDTA-CEE, 1982).

Otra opción para verificar los resultados, consiste en clasificar los campos de entrenamiento (6.8.2.2), para comprobar si se ajustan correctamente a las categorias que pretenden definir. Se trata ésta de una medida de la fiabilidad un tanto sesgada. Si las áreas de entrenamiento sirven para definir estadísticamente a las distintas categorías, parece lógico que los pixels incluídos en ellas tengan una mayor probabilidad de clasificación certera que el resto de los pixels de la imagen. Ahora bien, aunque no puede calificarse como un criterio riguroso de validación, esta práctica resulta muy interesante para explorar la "pureza" de cada campo de entrenamiento, o, dicho de otro modo, la precisión con la que identifican a un determinado tipo de cubierta. Si los pixels incluidos en estas áreas se asignan a otras clases, conviene delimitar nuevos campos de entrenamiento y/o simplificar la leyenda de trabajo.

La tercera vía de trabajo consiste en seleccionar, con posterioridad a la clasificación, una serie de áreas test, que permitan obtener una medida

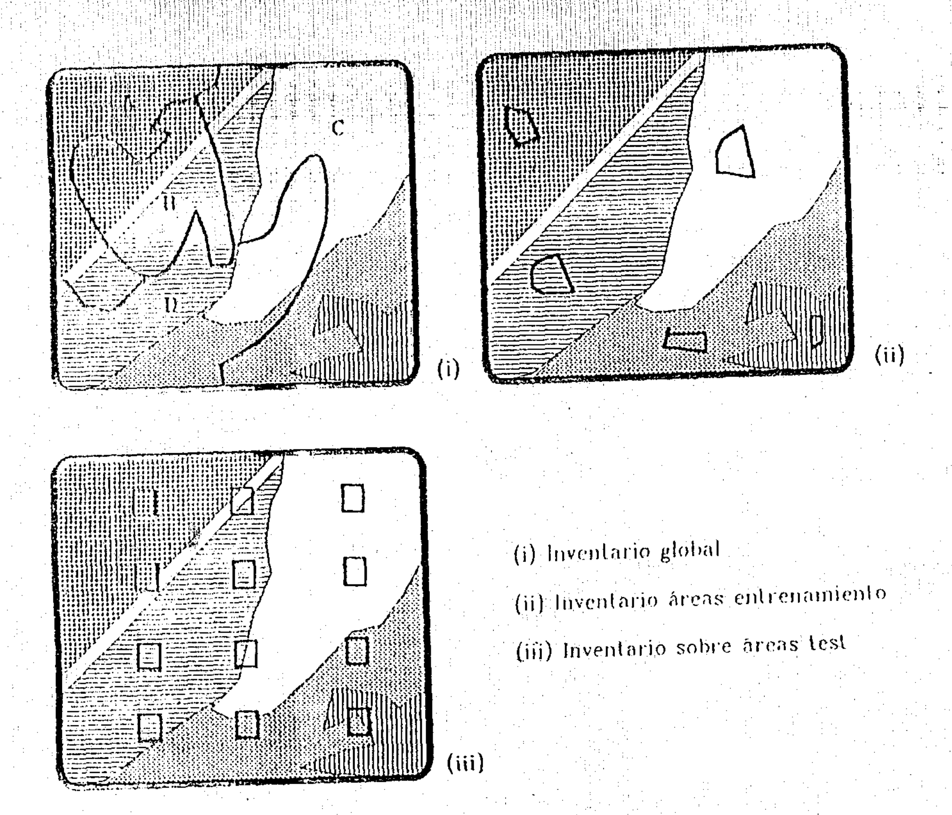


Fig. 7.4 - Medidas de fiabilidad en una clasificación

independiente del acuerdo entre mapa y verdad-terreno. Este procedimiento pasa por realizar un muestreo del área de estudio, a fin de obtener las medidas de campo necesarias para verificar los resultados de la clasificación. Tal muestreo supone un coste adicional al proyecto, que, además, no repercute en una mejora de su fiabilidad, sino sólo en la medida de ésta. Por ello, la preocupación por este tipo de estudios es relativamente reciente, aunque está ganando interés en la comunidad científica. Es obvio que una validación rigurosa de los resultados facilita, no sólo una medida de la calidad del documento que se aporta, sino también un criterio para demostrar la idoneidad de uno u otro método para una aplicación específica.

A partir de la realización del muestreo, puede construirse una tabla o matriz de confusión, en donde se resuman los acuerdos y desacuerdos

entre clases del mapa y del terreno. Esta matriz puede analizarse estadísticamente, con objeto de obtener una serie de medidas sobre la fiabilidad del trabajo: global y para cada una de las categorías. Puesto que la medida de la fiabilidad se estima a partir de un muestreo, su valor real se mueve entre unos márgenes, tanto más próximos al valor medio cuando mayor sea al tamaño de la muestra y menor el grado de error.

7.3. DISEÑO DEL MUESTREO PARA LA VERIFICACIÓN

El diseño y desarrollo del muestreo supone la columna vertebral del proceso de verificación. Al igual que en otras aplicaciones, el muestreo espacial sirve en este caso para seleccionar una pequeña parte del área de estudio, de tal forma que sea suficientemente representativa del conjunto. Esa semejanza con la población de referencia debe conseguirse, además, minimizando el tamaño de la muestra, con objeto de reducir los costes del proceso de verificación. En definitiva, la principal virtud de un buen muestreo es seleccionar adecuadamente una parte de la imagen clasificada, de tal forma que, siendo tan pequeña como sea posible, sea a la vez suficientemente representativa del conjunto. Esa semejanza depende de una serie de factores, que debe considerarse al planificar el muestreo: (i) método de selección de la muestra, (ii) tamaño y distribución, y (iii) nivel de confianza otorgado a la estimación.

7.3.1. Tipos de muestreo

Entre los tres parámetros arriba enunciados, la elección del método más idóneo de muestreo parece el más controvertirdo entre los especialistas. Los esquemas más regularmente empleados en el proceso de verificación son (Rosenfeld, 1982; Campbell, 1987; Congalton, 1988b):

(i) Aleatorio simple. Los elementos a verificar se eligen de tal forma que todos cuenten con la misma probabilidad de ser seleccionados, y que la elección de uno no influya en la del siguiente. Gracias a este carácter probabilístico, el muestreo aleatorio es el más sólido estadísticamente, si bien presenta problemas en su aplicación espacial, por cuanto puede suponer elevados costes de desplazamiento. Por otra parte, existe cierta probabilidad de no recoger adecuadamente la variación espacial presente en la imagen clasificada (fig. 7.5a).

(ii) Aleatorio estratificado. La muestra se realiza dividiendo la población en regiones o estratos, de acuerdo a una variable auxiliar (altitud,

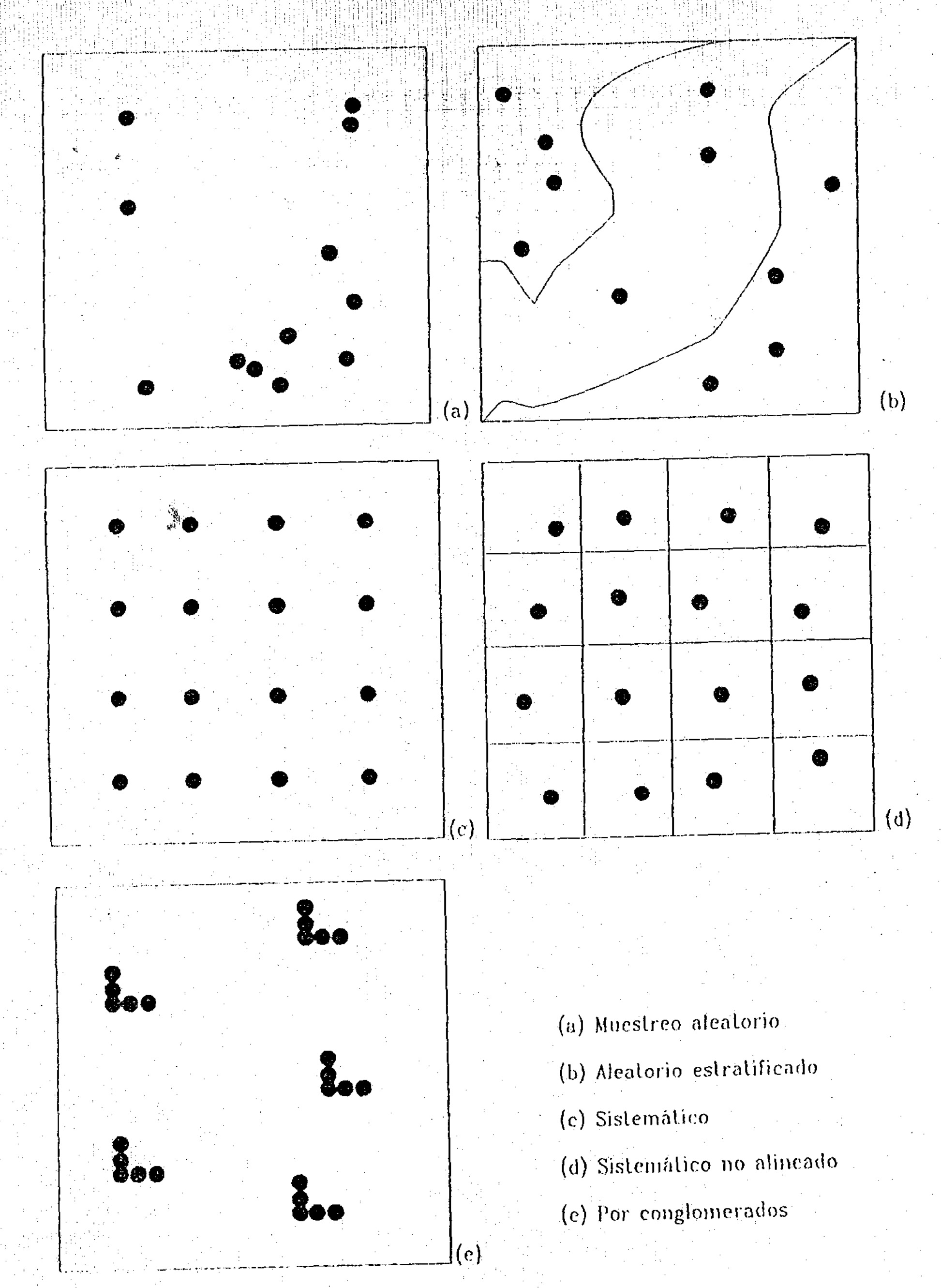


Fig. 7.5 - Tipos de muestreo aplicados a la verificación

por ejemplo). Es más complejo de diseñar que el anterior, pero aporta información sobre sub-conjuntos de la población, además de reducir el error de muestreo si la variable auxiliar se elige correctamente.

(iii) Sistemático. La muestra se distribuye a intervalos regulares, a partir de un punto de origen señalado aleatoriamente. Garantiza un muestreo completo de la superficie a verificar, pero puede facilitar estimaciones erróneas si existe algún tipo de patrón periódico en el área observada (geometría de las parcelas, por ejemplo). Por otro lado, no asegura una estimación probabilística, por cuanto no existe aleatoriedad en la selección de las observaciones.

(iv) Sistemático no alineado. Modifica el esquema anterior, gracias a variar aleatoriamente una de las dos coordenadas (fig. 7.5d). Esto permite introducir una cierta aleatoriedad en la elección de la muestra, mientras reduce el sesgo debido a la periodicidad. Por otra parte, sigue garantizando una revisión completa del territorio.

(v) Por conglomerados. Se selecciona como unidad de muestra un grupo de observaciones, denominado conglomerado (*cluster*), en lugar de individuos aislados. En otras palabras, en cada punto a verificar se toman varias muestras, en puntos vecinos al elegido aleatoriamente, y de acuerdo a un esquema prefijado. Por ejemplo, un conglomerado podría constituirse por cinco puntos, a cierta distancia del punto central y siguiendo una forma de L (fig. 7.5e). Este método de muestreo reduce los costes de transporte, pero resulta más complejo y, normalmente, menos preciso que los anteriores.

De entre ellos, el muestreo sistemático no alineado ha sido profusamente empleado en tareas de verificación de clasificaciones (Fitzpatrick-Lins, 1978; Rosenfeld, 1982; Dozier y Strahler, 1983; Chuvieco, 1986), gracias a las propiedades arriba enunciadas. Otros autores recomiendan métodos alternativos, como el aleatorio simple (Hord y Brooner, 1976), el estratificado por categorías (VanGenderen, 1978; Ginevan, 1978) o el muestreo por conglomerados (Todd et al, 1980). No obstante, parece conveniente comentar con más detalle el muestreo sistemático no alineado, en razón de su frecuente presencia en trabajos de verificación de clasificaciones.

En este tipo de muestreo, la elección de la muestra parte, habitualmente, de dividir el área de estudio en una malla regular de rectángulos, que podrían hacerse coincidir con la cuadrícula UTM. Sobre cada uno de ellos, se elige uno o varios puntos de muestreo, de acuerdo a un proceso de selección sistemático, pero no alineado. Esto quiere decir, que, en cada una de las columnas y filas de esa matriz de rectángulos, las coordenadas de cada punto de observación se eligen manteniendo un eje

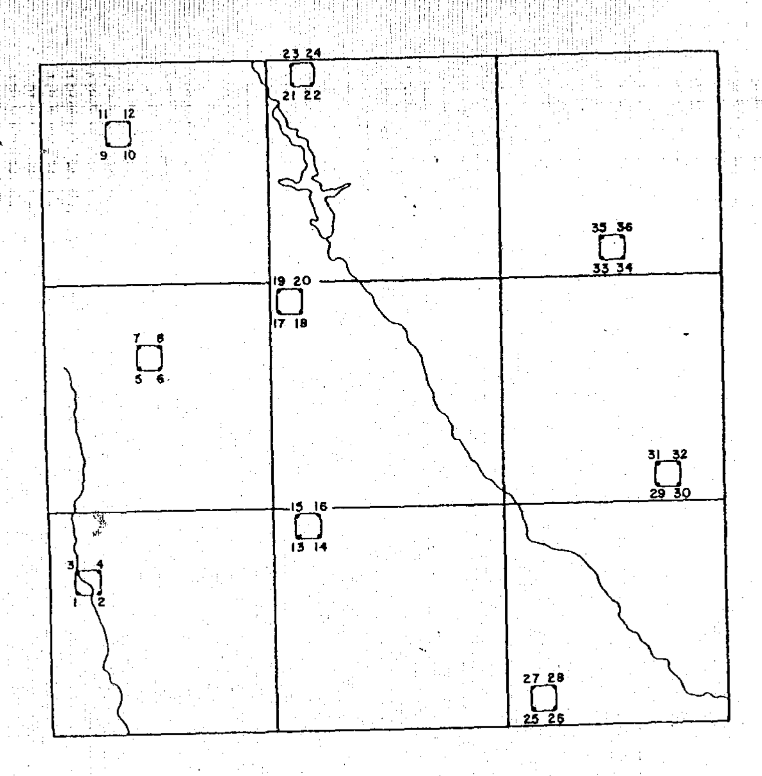


Fig. 7.6 - Diagrama de desarrollo del muestreo sistemático no alineado

constante, y variando el otro aleatoriamente (fig. 7.6). De esta forma, se introduce un cierto rasgo de aleatoriedad, a la vez que se mantiene una observación global del territorio (Berry y Baker, 1968).

Los trabajos experimentales de Congalton (1984 y 1988b) parecen aportar una visión más rigurosa para esta elección. Este autor partió de una serie de tres imágenes clasificadas, de ámbito agrícola, pastizal y forestal, para las que se contaba con una cartografía de referencia suficientemente detallada. Esto permitió superponer, digitalmente, las clasificaciones obtenidas con los mapas de la verdad-terreno, obteniendo una medida precisa del error total incluido en cada una de las tres imágenes. A partir de esta medida, aplicó los cinco esquemas de muestreo antes aludidos, para estudiar cuál de ellos la estimaba con mayor rigor. Con objeto de investigar la acción de diversos parámetros, se seleccionaron distintos tamaños de muestra y se aplicó el muestreo según varios escenarios. Las conclusiones de estos trabajos situaron al muestreo

aleatorio simple como el esquema más eficaz, seguido del aleatorio estratificado. El muestreo por conglomerados ofreció también buenos resultados, siendo especialmente propio en el caso de verificar grandes superficies en donde los costes de desplazamiento pueden ser cruciales. En ese caso, Congalton recomendaba el empleo de pequeños conglomerados, entre 5 y 25 pixels de tamaño según la variabilidad de la imagen. El autor desaconseja el empleo del muestreo sistemático y del sistemático no alineado, especialmente cuando la imagen tienda a presentar un error periódico, como es el caso de las zonas agrícolas o cubiertas por pastizales. Por ello, sugiere aplicar una evaluación previa de la auto-correlación espacial (Congalton, 1988a) puede facilitar la decisión sobre qué tipo de muestreo resulta más conveniente.

Nada comenta Congalton sobre los costes de desplazamiento asociados a cada uno de estos esquemas de muestreo. Por otras referencias, y nuestra propia experiencia, podemos establecer una jerarquía desde el muestreo aleatorio simple hasta el muestreo por conglomerados, de mayor a menor coste. Asimismo, en la valoración de Congalton, no se considera la estimación de la fiabilidad por categorías. En caso de que la clasificación haya incluido cubiertas poco desarrolladas en la zona de estudio, el muestreo aleatorio puede obviarlas, al no implicar un examen sistemático de toda la superficie. Por esta razón, aun con ser de gran interés, los trabajos de Congalton no anulan completamente el empleo del muestreo sistemático no alineado en trabajos de verificación. Una mayor investigación en esta línea podrá aportar nuevas orientaciones al respecto.

7.3.2. Tamaño de la muestra

En cuanto al tamaño de la muestra, Congalton (1988b) sugiere una superficie aproximada al 1 % de la superficie cartografiada. En éste, como en otros muestreos, el tamaño de la muestra depende del nivel de probabilidad, o de confianza, que quiera otorgarse a la estimación, así como de la propia variabilidad de la imagen considerada. Como se trata de medir una variable binomial (acierto-error), se emplea normalmente la fórmula:

$$n = \frac{z^2 \, p \, q}{E^2} \qquad [7.1]$$

donde **z** es la abcisa de la curva normal para un nivel determinado de probabilidad; **p** indica el porcentaje de aciertos estimado; **q**, el de errores (**q** = 1 - **p**), y E, el nivel permitido de error. El valor de **p** y **q** puede

estimarse a partir de datos auxiliares o simplemente igualarse a 50. Por ejemplo, si quiere conocerse el número necesario de puntos de verificación para estimar, con el 95 % de probabilidad, el error de un determinado mapa, suponiendo que los aciertos son del 85 %, y el máximo de error permitido es de ± 5 %, puede aplicarse:

$$n = \frac{1{,}96^2 \times 85 \times 15}{5^2} = 195{,}92$$

lo que indica que, al menos, se han de tomar 196 muestreas para obtener los niveles de precisión marcados en el muestreo. Según algunos autores, se precisan un mínimo de 50 puntos de verificación para obtener una estimación fiable del error (Hay, 1979). Se aconseja, además, realizar el muestreo para todas las clases por separado, partiendo de la clase con menor extensión. Esta marcará la proporción del área a muestrear para el resto de las categorías.

Una vez diseñado el método y tamaño de la muestra, y localizados los puntos de verificación, el paso siguiente consiste en obtener, para cada uno de ellos, la clase real y la deducida de la clasificación. La primera puede obtenerse a partir de trabajos de campo o de documentos auxiliares de mayor detalle (fotografías áreas, mapas de cultivos o vegetación), mientras la segunda se adquiere a partir del fichero digital con la imagen clasificada, o del documento temático si se optó por el análisis visual. Lógicamente, conviene obtener la información sobre la verdad-terreno en la fecha más cercana posible a la de adquisición de la imagen, evitando desfases temporales que harían inexacta cualquier comparación. De igual forma, resulta necesario localizar certeramente los puntos de verificación, con objeto de eludir desaveniencias más debidas a errores de posición que de asignación.

Como ejemplo de trabajo de verificación, se presenta el desarrollado para un proyecto de cartografía de la ocupación del suelo en Madrid y Guadalajara (Chuvieco, 1986). Este mapa se realizó a partir del análisis visual de dos imágenes TM, adquiridas en primavera y verano (figs. 5.13* y 5.14*). El área de estudio, unos 9.000 km², se dividió en 84 cuadrículas de 10 km de lado, sobre las cuales se seleccionaron celdillas de 1 km² por muestreo sistemático no alineado. La primera de estas celdillas, que serviría como origen del muestreo, se localizó aleatoriamente, mientras las restantes mantenían, en cada columna de la malla original, la coordenada x de la primera, variando aleatoriamente la coordenada y. Los puntos de verificación se señalaron en los cuatro

vértices de estas celdilas, lo que llevó a contar con 336 puntos. El tamaño de la muestra, cercano al 1 % de la superficie cartografiada, se ajusta al criterio más recomendado en este tipo de estudios (Fitzpatrick-Lins, 1978; Congalton, 1988b).

7.4. LA MATRIZ DE CONFUSIÓN

Consecuencia de la fase de muestreo será un listado de puntos test, para los que poseemos tanto su cobertura real como la deducida por la clasificación. Con estos datos puede formarse una matriz, denominada de confusión puesto que recoge los conflictos que se presentan entre categorías. Se trata de una matriz bidimensional, en donde las filas se ocupan por las clases de referencia, y las columnas por las categorías deducidas de la clasificación. Lógicamente ambas tendrán el mismo número y significado; se trata, en suma, de una matriz cuadrada: n x n, donde **n** indica el número de categorías.

La diagonal de esta matriz expresa el número de puntos de verificación en donde se produce acuerdo entre las dos fuentes (mapa y realidad), mientras los marginales suponen errores de asignación. La relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total expresa la fiabilidad global del mapa. Los residuales en filas indican tipos de cubierta real que no se incluyeron en el mapa, mientras los residuales en columnas implican cubiertas del mapa que no se ajustan a la realidad. En definitiva, representan los errores de omisión y de comisión, respectivamente (Aronoff, 1982; Owe y Ormsby, 1984).

La tabla 7.1 presenta la matriz de confusión correspondiente al proyecto anteriormente citado. Originalmente se distinguieron 14 clases, pero éstas se redujeron a 11 para la verificación, eliminando las categorías menos significativas en la zona.

El interés de estas tablas de confusión procede de su capacidad para plasmar los conflictos entre categorías. De esta forma, no sólo conocemos, por ejemplo, que nuestra clasificación asignó correctamente 279 de los 336 puntos muestreados, sino también la fiabilidad para cada una de las clases y las principales confusiones entre ellas.

En este caso, la precisión obtenida en el mapa varía notablemente de unas clases a otras, aunque en algunas no proceda realizar conclusiones muy rigurosas ante su escasa representación en la muestra. Las categorías urbanas y el agua ofrecen un porcentaje de exactitud bastante alto, si

Tabla 7.1
Matriz de confusion entre clases

Clase mapa → / Clase real ↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Total	Exact Usuar	Error Comis
1. Edif, compacta	14											14	100,0	0,0
2. Residencial		10										10	100,0	0,0
3. Herbáceos Secano			113				3		5			121	93,4	6,6
4. Regadío				15		2						17	93,8	6,2
5. Perennifolios					45		7	1	7			60	75,0	25,0
6. Caducifolios			1		1	6						8	75,0	25,0
7. Matorral							11	6	12			29	37,9	62,1
8. Pastizal			1				1	28		1		31	90,3	9,7
9. Past-Matorral			3				4	1	32			40	80,0	20,0
10. Roquedo									1	1		2	50,0	50,0
11. Agua											4	4	100,0	0,0
Total	14	10	118	15	46	8	26	36	57	2	4	336		
Exac. Productor	100	100	96	100	98	75	44	78	56	50	100	(%)		
Error omisión	0	0	4	0	2	25	56	22	44	50	0	(%)		

bien no puede aplicarse con rigor el de un 100 %, puesto que el número de puntos asignados a esas clases es relativamente pequeño. Los principales problemas surgen con las categorías menos uniformes: roquedo desnudo (frecuentemente imbricado con el matorral o los pastizales) y matorral (muy confuso con la clase pastizal-matorral, como es lógico en una cubierta de transición). Respecto a las categorías forestales, los bosques de caducifolias ofrecen mayores problemas, especialmente por la confusión entre cultivos regados y las especies caducifolias (allí donde las áreas irrigadas son de pequeña extensión y se entremezclan con árboles de ribera). También se detectan importantes problemas para separar los perennifolios de las zonas de pastizal y pastizal matorral. Esta confusión debe relacionarse con el método seguido (análisis visual) y con la frecuente mezcla entre áreas de matorral, pastizal y pastizal-matorral en la zona de estudio, ya que presenta una intensa degeneración de los tipos vegetales debido a la acción antrópica. En cuanto a las superficies agrícolas, los cultivos herbáceos de secano aparecen imbricados con el pastizal, sobre todo en sectores marginales donde es más frecuente el abandono del cultivo.

Si se realizó correctamente la fase de entrenamiento, la mayor parte de estas confusiones ya habrían sido detectadas, pero aquí se ofrece una medición mucho más explícita de estos problemas. A partir de estos datos, puede orientarse la búsqueda de nuevos métodos de clasificación, el empleo de imágenes de otras fechas, o el de bandas auxiliares (relieve o suelos), con objeto de facilitar un documento suficientemente certero. Asimismo, puede optarse por una leyenda simplificada, que reduzca las confusiones entre categorías de transición.

7.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA MATRIZ DE CONFUSIÓN

7.5.1. Medidas globales de fiabilidad

A partir de la matriz de confusión pueden desarrollarse toda una serie de medidas estadísticas que concluyan el proceso de validación. La más simple consiste en calcular la fiabilidad global del mapa, relacionando los elementos de la diagonal con el total de puntos muestreados:

$$F_m = \frac{\Sigma X_i}{\Sigma \Sigma X_{ij}} \times 100 \qquad [7.2]$$

En el caso que nos ocupa, la fiabilidad calculada es de un 83,04 % (100 x 279 / 336). Ahora bien, ese valor constituye únicamente una estimación basada sobre la muestra. De acuerdo a la teoría del muestreo, pueden calcularse los umbrales inferior y superior en los que se encontraría la exactitud real alcanzada por el mapa. Ese intervalo se calcula, para un determinado nivel de significación (α), a partir del error del muestreo (ES) y del nivel de probabilidad ($1 - \alpha$):

$$F = F_m \pm z \; ES \qquad [7.3]$$

donde z indica la abcisa del área bajo la curva normal para ese nivel de probabilidad ($1 - \alpha$); ES es el error estándar del muestreo, en función del porcentaje de aciertos (p), de fallos (q) y del tamaño de la muestra (n):

$$ES = \frac{\sqrt{p\, q}}{n} \qquad [7.4]$$

Para el caso de la matriz de confusión que venimos comentando, el número de puntos bien asignados fue 279, frente a los 336 totales. Esto

significa una fiabilidad estimada del 83,04 %. Con un nivel de significación de 0,05 (probabilidad del 95 %), el intervalo de confianza puede calcularse como:

$$F = 83{,}04 \pm 1{,}96 \sqrt{(83{,}04 \times 16{,}96 / 336)} = 83{,}04 \pm 4{,}014$$

En definitiva, puede asegurarse, con un 95 % de probabilidad, que la fiabilidad real se encuentra entre 79,02 y 87,05 %. Por tanto, puede considerarse como un mapa bastante fiable, pues aun la estimación más pesimista de la fiabilidad está muy cercana al 80 %.

7.5.2. Fiabilidad del usuario y del productor

Ahora bien, conviene tener en cuenta que este valor puede ocultar importantes diferencias entre categorías. Por ello, un análisis más riguroso debe también considerar las celdillas marginales de la matriz. En el caso de las filas, los marginales indican el número de pixels que, perteneciendo a una determinada categoría, no fueron incluidos en ella. Estos se denominan errores de omisión (E_o). Para cada clase se calculan como:

$$E_{oi} = \frac{X_{i+} - X_{ii}}{X_{i+}} \qquad [7.5]$$

donde X_{i+} indica el marginal de la fila i, y X_{ii} la diagonal de dicha fila.

De igual forma, las celdillas no diagonales de las columnas expresan los errores de comisión; esto es, pixels que se incluyeron en una determinada categoría perteneciendo realmente a otra:

$$E_{ci} = \frac{X_{+i} - X_{ii}}{X_{+i}} \qquad [7.6]$$

donde X_{+i} indica el marginal de la columa i, y X_{ii} la diagonal de dicha columna.

Los errores de omisión y comisión expresan dos enfoques del mismo problema. Los primeros se refieren a una definición imperfecta de la categoría. Los segundos, a una delimitación excesivamente amplia. Desde otro punto de vista, algunos autores hablan de exactitud del usuario y del productor (Aronoff, 1982; Story y Congalton, 1986). La primera está en

relación inversa con los errores de comisión, mientras la segunda lo está con los de omisión:

$$F_{ui} = \frac{X_{ii}}{X_{i+}} \times 100 \qquad [7.7]$$

y

$$F_{pi} = \frac{X_{ii}}{X_{+i}} \times 100 \qquad [7.8]$$

para cada una de las i categorías. El interés de esta distinción puede mostrarse con un sencillo ejemplo. Si para una especie forestal el error de omisión es bajo, existe una alta probabilidad de que esa especie esté incluida en el mapa, lo que significa un logro para el productor del mismo. Sin embargo, puede a la vez haberse producido un alto error de comisión, lo que implica que la probabilidad de que una zona incluida en el mapa como bosque sea tal es muy baja. Esto supone un grave riesgo para el usuario de esa información (Story y Congalton, 1985).

En el caso de la matriz de confusión recogida en 7.1, el pastizal ofrece un fiabilidad del productor del 92,3 %; esto es, nueve de cada diez superficies con esta cubierta fueron identificadas correctamente. Sin embargo, la fiabilidad del usuario supera ligeramente el 75 %, lo que quiere decir que sólo tres cuartas partes de los pastizales cartografiados recogen realmente esa cubierta. Ambas ópticas son complementarias y de gran trascendencia. La primera desde el punto de vista del productor del mapa, la segunda de la persona que lo utiliza.

7.5.3. Aplicación del análisis categórico multivariante

Hasta ahora hemos estudiado lo que ocurre en la diagonal y en los residuales de filas y columnas. También resulta de gran interés analizar las relaciones múltiples entre las distintas categorías. Con este objetivo, se han introducido en los últimos años las técnicas de análisis categórico multivariante, idóneas para el estudio global de matrices de confusión (Congalton et al, 1983; Congalton y Mead, 1983; Campbell, 1987).

Uno de los índices más empleados, en este sentido, es el estadístico Kappa (κ), que mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que cabría esperar simplemente por azar. En definitiva, intenta delimitar el grado de ajuste debido sólo a la exactitud de la clasificación,

prescindiendo del causado por factores aleatorios. La estimación de κ se obtiene a partir de la siguiente fórmula (Hudson y Ramn, 1987):

$$\kappa = \frac{N \Sigma X_{ii} - \Sigma X_{i+} X_{+i}}{N^2 - \Sigma X_{i+} X_{+i}} \qquad [7.9]$$

en donde X_{ii} indica el acuerdo observado, y X_{i+} X_{+i} (producto de marginales) el acuerdo esperado. El acuerdo observado aparece en la diagonal de la matriz, mientras el esperado nos sirve para calcular el ajuste entre mapa y realidad que puede deberse al azar. La estimación de κ nos sirve para conocer el grado de significación de este estadístico, y, por tanto, si el acuerdo observado se aleja o no significativamente del acuerdo esperado al azar. En definitiva, el test pretende evaluar si la clasificación ha discriminado las categorías de interés con precisión significativamente mayor a la que se hubiera obtenido con una asignación aleatoria.

En el caso de la matriz de confusión que venimos analizando, el valor estimado del estadístico kappa es 0,78962, lo que indica que la clasificación efectuada es un 78,96 % mejor que la esperada por azar. Un valor de κ próximo a 1 indica un acuerdo pleno entre la realidad y el mapa, mientras un valor cercano a 0 sugiere que el acuerdo observado es puramente debido al azar. Por su parte un valor negativo, supone también una clasificación pobre, si bien su sentido depende de otros factores externos, como el propio tamaño de la muestra.

Puede considerarse que κ se distribuye normalmente, por lo que es sencillo calcular intervalos de confianza en torno al valor estimado. De igual forma, pueden señalarse niveles de significación, con objeto de contrastar cuando dos o más clasificaciones difieren entre sí significativamente para un determinado nivel de probabilidad. Este test puede emplearse para contrastar la validez efectiva de distintos métodos de clasificación (Congalton et al, 1983; Chuvieco y Congalton, 1988a). En el caso de la matriz que venimos comentando, a partir de un nivel de probabilidad del 95 %, el valor de κ se mueve entre 74,09 y 83,84 %. Como vemos, se trata de una estimación menos optimista que la aportada por la medida estándar de fiabilidad, aunque no difieren notablemente.

En el caso de que se pretenda comparar dos matrices de confusión -ya sea generadas a partir de distintos métodos de asignación, ya de distintas imágenes o de distintos individuos-, κ puede indicarnos cual de ellos es más efectivo en su conjunto. Ahora bien, en el caso de que se

Tabla 7,2
Matriz de confusion normalizada

Clase del Mapa

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Total
	1	,7331	,0290	,0093	,0285	,0204	,0324	,0214	,0135	,0098	,0619	,0409	1,000
C	2	,0290	,6982	,0107	,0327	,0234	,0371	,0245	,0155	,0112	,0710	,0468	1,000
l	3	,0096	,0110	,8059	,0108	,0078	,0123	,0568	,0051	,0408	,0235	,0155	1,000
a	4	,0198	,0227	,0073	,6924	,0160	,1266	,0167	,0106	,0076	,0485	,0320	1,000
s	5	,0097	,0112	,0036	,0110	,7167	,0125	,1236	,0157	,0565	,0239	,0158	1,000
e	6	,0342	,0392	,0379	,0386	,0828	,5684	,0289	,0183	,0132	,0837	,0552	1,000
	7	,0218	,0250	,0081	,0246	,0176	,0279	,4239	,1518	,2105	,0534	,0353	1,000
R	8	,0223	,0256	,0248	,0252	,0181	,0286	,0567	,6819	,0259	,0548	,0361	1,000
e	9	,0216	,0248	,0559	,0244	,0174	,0276	,1641	,0347	,5416	,0529	,0349	1,000
a	10	,0580	,0665	,0214	,0655	,0469	,0743	,0490	,0311	,0672	,4264	,0938	1,000
l	11	,0408	,0468	,0151	,0461	,0330	,0523	,0345	,0219	,0158	,1000	,5939	1,000
Totl		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	

intente comparar la exactitud sólo de algunas categorías, el estadístico κ no nos ofrece una valoración detallada. Con vistas a solucionar este problema, el prof. Congalton (1984) propuso aplicar un procedimiento multivariado para normalizar un matriz cuadrada (Bishop et al, 1975). Se trata de un método iterativo que ajusta los totales de filas y columnas a un valor común (+1), mediante sucesivos incrementos o reducciones en las celdillas de la matriz. El proceso se detiene cuando los marginales de cada fila y columna sumen + 1,00, o un valor muy próximo a éste. En la tabla 7.2 se presenta la normalización de la matriz que venimos analizando, gracias a un programa cedido por el Prof. Congalton.

Este proceso ofrece una nueva medida de la fiabilidad global. Basta calcular el valor medio de los elementos de la diagonal, que siguen indicando el acuerdo entre filas y columnas. Obviamente la situación ideal sería que todos los elementos diagonales de la matriz fueran igual a 1. Esto indicaría un acuerdo perfecto entre realidad y mapa, mientras una pobre clasificación se mostraría en valores diagonales muy bajos.

En este caso, el valor medio de las diagonales ofrece un porcentaje medio de fiabilidad del 62,57 %. Por categorías, se matizan más los valores aportados por la tabla original, especialmente en lo que se refiere a acuerdos estimados perfectos, como es el caso de la urbanización

compacta o residencial que pasan del 100 % de exactitud al 73,31 y 69,82%, respectivamente. El matorral y el pastizal-matorral siguen mostrando los valores de exactitud más bajos, en torno al 42 %.

Conviene tener en cuenta que estas medidas representan una estimación baja de la fiabilidad real, debido a las propias características del proceso de normalización. Es preciso considerar que la matriz de confusión es un caso muy peculiar de una tabla de contingencia, por cuanto aparecen con frecuencia celdillas con valores muy bajos o iguales a cero, ya que hay confusiones entre categorías muy poco probables. Como quiera que el proceso de normalización añade una pequeña cantidad a cada celdilla para evitar los ceros, las celdillas que expresan aciertos se ven infravaloradas frente al resto. Este es el caso del agua, con un valor pleno de aciertos en la tabla original, que desciende a 59,39% en la normalizada, como consecuencia del reducido tamaño de la muestra.

Pese a este problema, el proceso de normalización ofrece una visión complementaria a la recogida en la matriz original. Su medida de la fiabilidad global y para cada una de las categorías, puede considerarse, con las reservas apuntadas, como una interesante alternativa a los métodos tradicionales, permitendo comparar matrices con distinto número de muestras.

8. TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

8.1. NECESIDAD DE LOS SIG

Para la mayor parte de los usuarios de la teledetección espacial, el fruto de los ensayos de clasificación es un mapa temático que refleje adecuadamente el estado de la variable de interés (tipo de suelo o de vegetación) en el área de estudio.

En muchos casos la obtención de ese mapa constituye la fase final del trabajo, su resultado último. En otros, se trata de un documento mas que proporciona -junto a otras variables territoriales- un conocimiento integrado del espacio en estudio. En ese planteamiento, la cartografía obtenida a partir de la teledetección constituye una variable más dentro de un sistema de información integrado, tan interesante para el mejor conocimiento del espacio que nos rodea. En pocas palabras, la teledetección, en este contexto, constituye una técnica más de información territorial, que, unida a otros datos cartográficos o estadísticos, facilita una evaluación más certera del paisaje, necesaria para su mejor aprovechamiento o conservación (fig. 8.1).

Este tipo de enfoques se han visto notablemente favorecidos por las nuevas tecnologías de almacenamiento, manipulación y salida gráfica de la información espacial. De esta forma, han nacido los denominados Sistemas de Información Geográfica (SIG), que pueden definirse como bases informatizadas de datos con un algún tipo de componente espacial. Esto significa que la información que almacenan está referenciada geográficamente, ya se trate de mapas, estadísticas o datos climáticos sobre un territorio concreto, por lo que todas estas variables pueden relacionarse mutuamente de formas muy diversas. Por cuanto la información que contienen se almacena en formato digital, los SIG aprovechan las posibilidades analíticas de los ordenadores, facilitando múltiples operaciones que resultan difícilmente accesibles por medios convencionales: generalización cartográfica, integración de variables es-

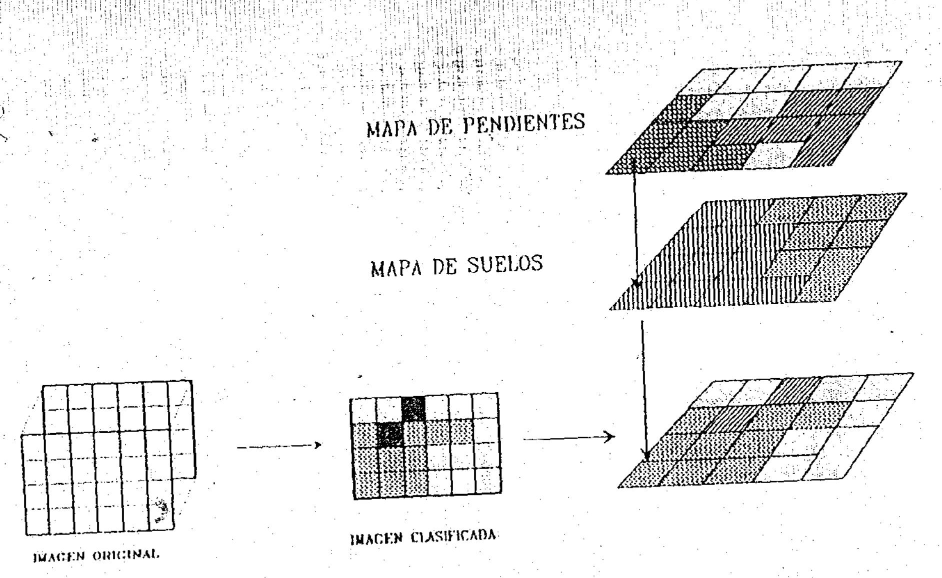


Fig. 8.1 - Clasificación y Sistemas de Información Geográfica

paciales, análisis de vecindad, etc. Además, los SIG permiten almacenar esa información espacial de forma eficiente, facilitando su actualización y acceso directo al usuario. En definitiva, amplían enormemente las posibilidades de análisis que brindan los mapas convencionales, además de facilitar su almacenamiento y visualización.

Un SIG está compuesto por unos equipos físicos, especializados en el manejo de información espacial, y una serie de programas que, conectados con aquellos, permiten realizar múltiples transformaciones a partir de las variables espaciales introducidas al sistema. El SIG no es un producto cerrado en sí, sino un compuesto de elementos diversos: ordenador, digitizador, trazador gráfico, impresoras, distintos paquetes de programas, orientado hacia una finalidad específica. También existen SIG comerciales, que intentan recoger todos estos productos bajo una misma estructura, si bien lo más habitual -en el momento presente- sea la comercialización exclusiva de los programas, que pueden adaptarse a configuraciones *hardware* muy amplias.

De ahí surge la primera conexión entre la teledetección y los SIG: ambos utilizan equipos muy similares, puesto que ambos se dirigen a procesar información con un claro componente espacial. De esta forma,

ambas tecnologías han caminado bastante parejas a lo largo de las últimas décadas, mostrándose, en el momento presente, una clara convergencia (Ehlers et al, 1989). Si los SIG son una herramienta idónea de almacenamiento y gestión medio ambiental, la teledetección brinda al sistema una de sus fuentes de información más interesantes. En pocas palabras, los SIG son la continuación lógica de una buena parte de las aplicaciones temáticas de la teledetección.

8.2. FUNCIONES DE UN SIG

Los primeros SIG se desarrollaron en los años 60, como respuesta a las crecientes necesidades de información sobre el territorio. Canadá resultó pionero en el nacimiento de estos programas, si bien se extendieron rápidamente a su vecino del sur y a otros países anglosajones. A finales de los años 60 ya existían varios SIG operativos, como el DIME (*U.S. Bureau of Census*) o el GRDSR (*Statistics Canada*). El creciente interés por la planificación medio ambiental permite que los SIG se consoliden en la década de los 70, paralelamente al vertiginoso desarrollo de los equipos informáticos. En estos años aparecen los primeros planes de estudio universitarios sobre esta técnica, así como algunas empresas privadas dedicadas a su desarrollo y explotación, mientras crece el interés de agencias oficiales en sus distintas aplicaciones. Actualmente, los SIG centran el interés y la inversión de un amplio abanico de profesionales. Baste citar, como ejemplo, la reciente aparición de los primeros manuales dedicados a esta técnica (Burrough, 1986; Berry, 1987), de revistas especializadas en sus aplicaciones (*International Journal of Geographic Information Systems*, publicada a partir de 1987), y de congresos científicos específicamente dedicados a su estudio. Sociedades como la *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing-GIS division, Remote Sensing Society, URISA* y *Auto-Carto* desarrollan frecuentes actividades conectadas con este tipo de técnicas.

En esencia, un SIG proporciona un almacenamiento coherente de la información espacial, que puede ser actualizada o manipulada con el mínimo esfuerzo. Permite obtener modelos cartográficos, a partir de la transformación o combinación de diversas variables: señalar corredores de una determinada distancia a un río o carretera; realizar tablas de coincidencia entre dos o mas mapas; calcular pendientes, exposiciones o medidas de textura; superponer dos o más capas de información, etc. Asimismo facilita la presentación gráfica de los resultados, al permitir el acceso a diversos periféricos controlados por ordenador. Por último, un SIG puede emplearse como instrumento de simulación, "... como campo

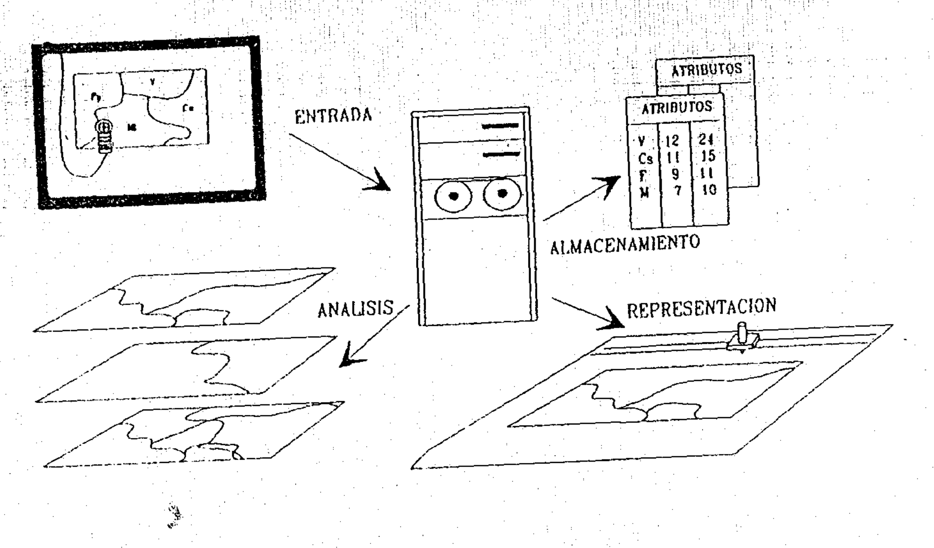


Fig. 8.2 - Módulos de un S.I.G.

de pruebas para el estudio de los procesos ambientales o el análisis de los impactos causados por decisiones de planeamiento" (Burrough, 1986). En otras palabras, gracias al ordenador pueden simularse las consecuencias de ésta o aquella decisión, antes de que un error de previsión haya modificado irreversiblemente el paisaje mismo.

Para ilustrar con más detalle las aplicaciones de un SIG y su conexión con la teledetección espacial, conviene exponer previamente los principales componentes de este tipo de programas. Aunque la variedad del mercado es muy amplia, tanto en el rango de funciones que soportan, como en la estructura de almacenamiento, la mayor parte de los SIG incluyen los siguientes módulos: (i) entrada de información, (ii) almacenamiento y organización de la base de datos, (iii) análisis, y (iv) representación gráfica (fig. 8.2). A continuación se repasa la funcionalidad de cada uno de estos módulos, con especial énfasis en su conexión con las técnicas analizadas en esta obra[1].

[1] No se pretende aquí proponer un capítulo sobre SIG en sí mismos, pues se trata de una técnica de gran desarrollo, merecedora de mayor estudio. Una amplicación de las ideas recogidas en este capítulo puede consultarse en: Haefner (1977), Dangermond (1982), Marble (1984), Burrough (1986), y Cebrian (1988).

8.2.1. Entrada de datos

Para que pueda efectuarse un análisis integrado entre variables es preciso que todas ellas sean plenamente compatibles. Esto significa que se alojen en el mismo soporte (digital), con el mismo formato y sujetas a un sistema de referencia común. Por ello, la función más crucial de un SIG se encarga de la entrada y transformación de datos, para que todos ellos resulten coherentes con la base de referencia seleccionada para el proyecto.

A este respecto conviene tener presente que la información que se almacena en un SIG puede proceder de fuentes muy variadas: teledetección, cartografía a diferentes escalas y/o proyecciones, datos demográficos o climáticos, modelos digitales del terreno, etc. Por esta razón, un SIG debe incorporar la posibilidad de acceder a todas estas variables, así como la de transformarlas apropiadamente para que sean mutuamente relacionables.

En primer lugar, es preciso que esa información sea convertida a formato digital, compatible con el ordenador que soporte el SIG. Esta digitización puede realizarse a partir de medios muy variados (6.3.1.1), en función del tipo de variables que quieran introducirse al sistema. Para información alfanumérica, como datos demográficos o climáticos, resulta necesario acudir al teclado, mientras para mapas convencionales el medio más idóneo es un digitizador de mesa, que facilita la obtención automática de coordenadas. Si lo que se pretende es incorporar al sistema imágenes analógicas, como fotografías aéreas o copias en papel de imágenes de satélite, resulta necesario acudir a un rastreador de barrido (*scanner*), que permite traducir niveles de gris en valores numéricos.

Una vez convertidas a formato digital, se requiere que las distintas variables tengan un sistema de referencia común, con objeto de que sean fácilmente relacionables. Conviene considerar que los mapas originales pueden referirse a distintas escalas o proyecciones, lo que impide su inmediata superposición. Para obviar este problema, los SIG incluyen una serie de rutinas para transformar coordenadas entre distintas proyecciones, y de distintas escalas a la elegida como referencia. En caso de conversión entre distintas proyecciones, basta aplicar una ecuación matemática ya establecida. Si quieren, por el contrario, aplicarse correcciones más severas a esas variables, el proceso requerido es similar a las correcciones geométricas de la imagen, más arriba estudiadas (6.5.3): se localizan puntos de control, comunes a la proyección original y a la de referencia; a partir de ellos se estiman una serie de funciones, que

ajustan con el mínimo error ambos conjuntos de coordenadas, y, por último, se trasvasan las coordenadas originales al nuevo sistema de referencia.

La experiencia de trabajo con un SIG, recomienda incorporar al módulo de entrada de datos algún procedimiento para depurar los errores que hayan podido producirse en la fase de digitización. Los más comunes son los debidos a malos ajustes entre polígonos fronterizos, existencia de áreas no propiamente cerradas, o errores en el etiquetado de algunos elementos: polígonos y líneas sin atributo, puntos sin identificador, etc.

8.2.2. Almacenamiento y Organización de los datos

Una vez convertida a formato digital, se precisa que la información se disponga de una forma coherente, de tal modo que se facilite su almacenamiento, consulta y actualización. La mayor parte de los expertos distinguen, a este respecto, dos tipos de estructuras de almacenamiento: vectorial y raster (fig. 8.3). Las diferencias entre una y otra pueden ilustrarse con un sencillo ejemplo. Si se pretende almacenar digitalmente la información contenida en un mapa de suelos, puede optarse por una doble alternativa. Por un lado, el mapa podría definirse por las líneas que separan distintos tipos de suelos. En este sentido, bastaría almacenar las coordenadas de esas líneas para contar con toda la información original, supuesto que podamos reconstruir, de esas líneas, la categoría a que pertenece cada unidad edáfica. Para ello, es preciso describir topológicamente el mapa digitizado; esto es, diseñar una tabla de referencia en donde se indique a qué línea pertenece cada coordenada, a qué polígono cada línea y a qué categoría cada polígono.

Otra opción para el almacenamiento, sería dividir la superficie que ocupa ese mapa en una matriz de celdillas o teselas, todas ellas del mismo tamaño, que se considerasen como unidades elementales de información. Dicho de otro modo, el mapa se convertiría en una malla regular de pixels, en cada uno de los cuales se almacenaría un valor numérico, descriptor del tipo de suelo que alberga. En el primer caso, las unidades se definen por sus fronteras, indicando implícitamente su contenido. En el segundo, los contenidos están explícitamente definidos y las fronteras sólo de modo implícito (Cebrián, 1988).

Ambos sistemas ofrecen ventajas e inconvenientes para el almacenamiento y posterior manipulación de variables. Sin profundizar excesiva-

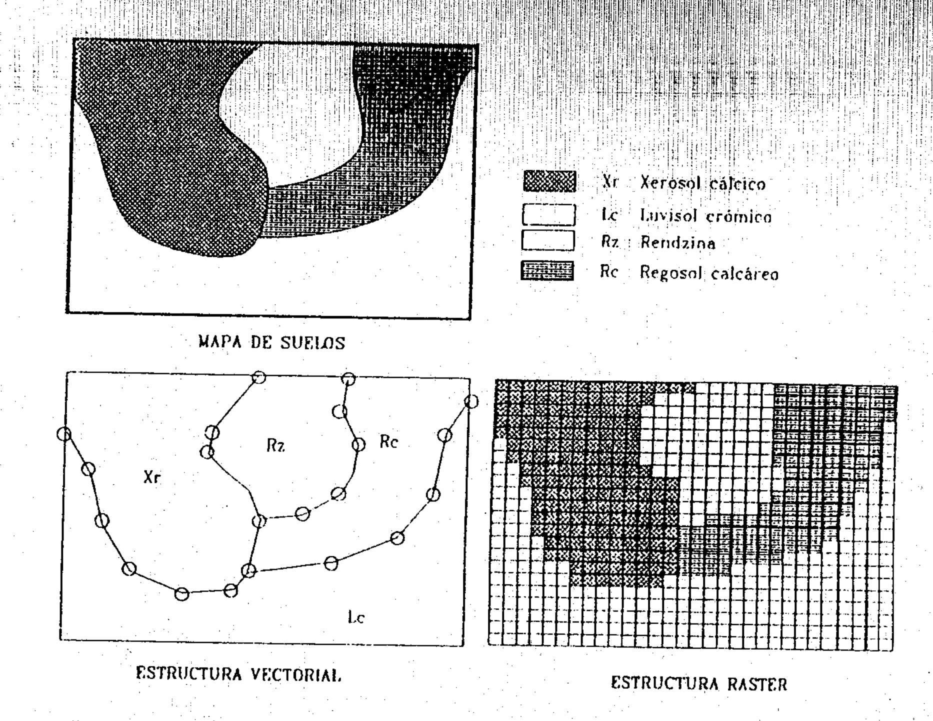
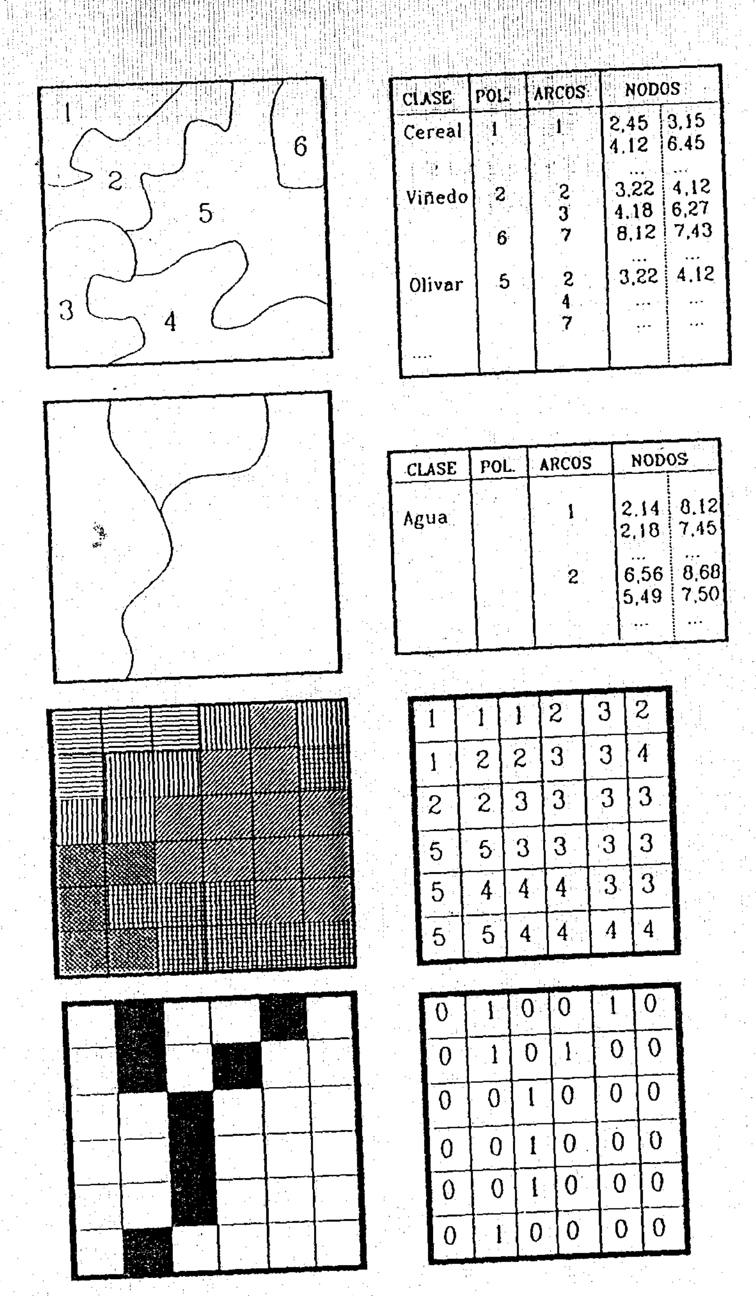


Fig. 8.3 - Estructuras de almacenamiento de datos

mente en su análisis[2], podemos resumir la polémica sobre la conveniencia de uno u otro en los siguientes párrafos:

(i) El formato vectorial es más conveniente para el almacenamiento, puesto que cada unidad se define por sus límites y no por todas las cuadrículas que engloba. En el formato raster, hay tantos números como variables x teselas, independientemente de si existen pocas o muchas fronteras en el área de estudio (fig. 8.4). Para el caso de paisajes muy homogéneos, habría muchas teselas con el mismo valor, lo que supone almacenar información irrelevante. Para solventar este problema se ha propuesto utilizar teselas de distinto tamaño, grandes en unidades homogéneas y pequeñas para aquellas zonas más complejas. Este es el fundamento del denominado sistema de '*quadtrees*' (Cebrián y Mark, 1986), ya activo en algunos programas comerciales (TYDAC, 1988).

[2] Un examen más detallado de esta cuestión se incluye en Schneider (1979), Dangermond (1982), Cebrián y Mark (1987) y Duecker (1987).



CLASE	POL.	ARCOS	NODOS	
Cereal	1	1	2,45 4,12 ...	3,15 6,45 ...
Viñedo	2	2 3	3,22 4,18	4,12 6,27
	6	7	8,12 ...	7,43 ...
Olivar	5	2 4 7	3,22	4,12 ... ...
....				

CLASE	POL.	ARCOS	NODOS	
Agua		1	2,14 2,18 ...	8,12 7,45 ...
		2	6,56 5,49 ...	8,68 7,50 ...

1	1	1	2	3	2
1	2	2	3	3	4
2	2	3	3	3	3
5	5	3	3	3	3
5	4	4	4	3	3
5	5	4	4	4	4

0	1	0	0	1	0
0	1	0	1	0	0
0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	0
0	1	0	0	0	0

Fig. 8.4 - Necesidades de almacenamiento en estructuras vectoriales y teselares

(ii) También la estructura vectorial es más ventajosa en lo que se refiere a la precisión, por cuanto cada unidad se define por sus límites reales. En el caso de la estructura raster, el espacio se divide en unidades discretas (celdillas o teselas), y las fronteras entre clases se deben adaptar a ese trazado regular (fig. 8.5). Esta simplificación de las fronteras será tanto más intensa cuanto mayor sea el tamaño real de la tesela base (en otras palabras, cuanto menor sea la resolución espacial del SIG).

(iii) Por el contrario, el formato raster resulta más conveniente para realizar análisis espaciales: proximidad, rutas óptimas, superposición de mapas, etc., puesto que cada unidad espacial está definida explícitamente. Por su parte, para obtener el área situada a una determinada distancia de un río, basta encontrar todas las celdillas vecinas a las que definen dicho río (fig. 8.6a). Por el contrario, en una estructura vectorial, el río vendría definido por un conjunto de coordenadas, con lo que se trataría crear un nuevo polígono, a partir de la línea del río, con la distancia fijada respecto a él. Esto implica calcular un corredor a cada lado de esa

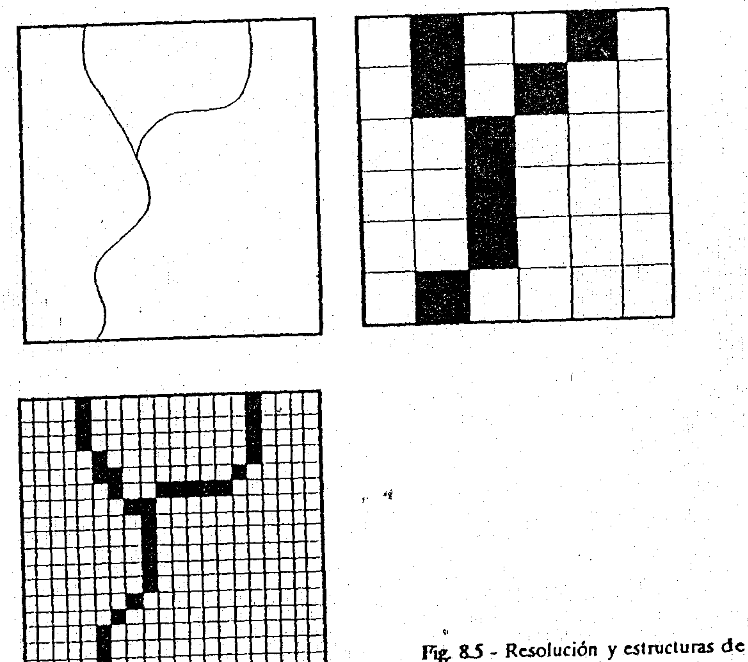


Fig. 8.5 - Resolución y estructuras de almacenamiento

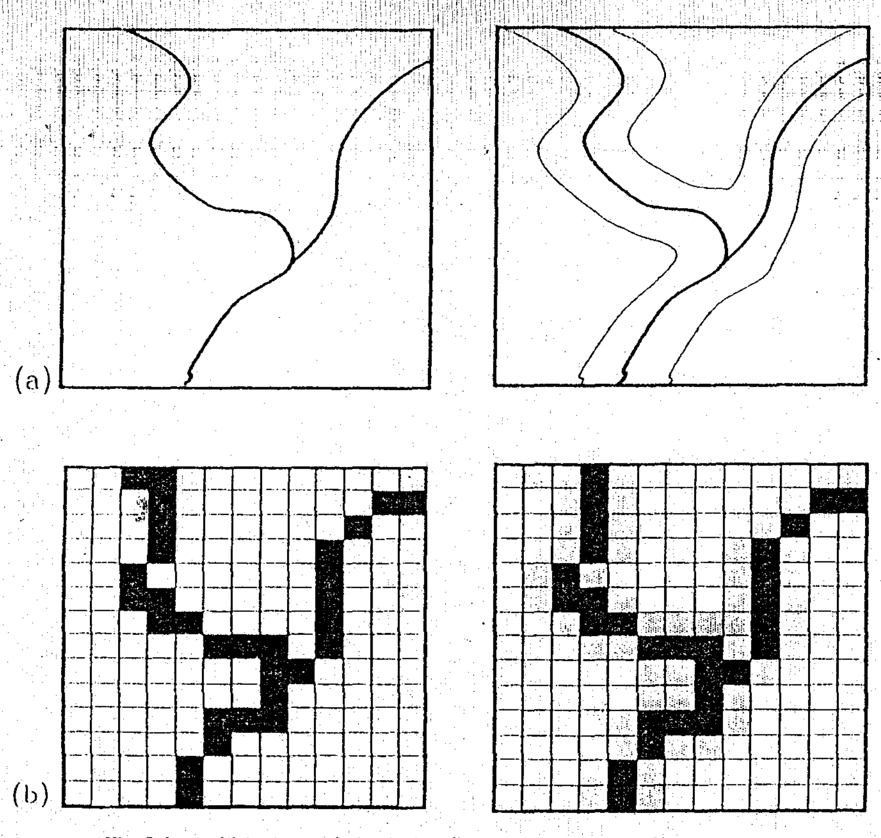


Fig. 8.6 - Análisis de proximidad a partir de estructuras vectoriales y teselares

línea, e identificar las coordenadas que lo definen (fig. 8.6b). En el caso de la superposición, basta relacionar las celdillas, una a una, en el formato teselar, mientras resulta una compleja tarea de intersección de polígonos y supresión de límites comunes en el vectorial (fig. 8.7).

(iv) Como consecuencia de lo anterior, los programas que manejan información vectorial son más caros y exigen mayor volumen de cálculo que los basados sobre formato raster. El tiempo de manipulación es, asimismo, mucho mayor en el caso del formato vectorial. Por ejemplo, un análisis de proximidad realizado sobre un mapa de carreteras que cubra una hoja del Mapa Topográfico Nacional, puede invertir de 5 a 15 horas (depende de la complejidad) en un sistema vectorial, mientras difícilmente sobrepasará los 10 minutos en un sistema raster. Ambos

cálculos se estiman para un ordenador personal preparado para este tipo de análisis[3].

Como quiera que ambos sistemas poseen ventajas e inconvenientes, se están desarrollando programas que permitan convertir la información deun formato a otro, eligiendo aquel más conveniente para cada uno de los fines que se pretendan (Ehlers et al, 1989). La conversión de formato vectorial a raster podemos decir que es bastante sencilla: basta construir las fronteras entre unidades para "llenar" automáticamente las celdillas situadas entre ellas. Simplificando las cosas, el programa cambia el valor que define cada celdilla cuando encuentra una frontera entre categorías. Por el contrario, la conversión raster a vectorial resulta bastante compleja: es preciso encontrar los bordes entre unidades y definir después éstos por sus coordenadas. No obstante, ya existen algunos programas comerciales que resuelven esta conversión.

Independientemente de la estructura de almacenamiento que se seleccione, el SIG debe incorporar algunas opciones para la búsqueda y actualización selectiva de esa información. Existen diversas opciones, a este respecto, si bien la estructura relacional es la más comúnmente utilizada (Burrough, 1986), puesto que facilita búsquedas complejas mediante las sencillas reglas de la lógica booleana (AND, OR, NOT, XOR y sus derivados). Su principal ventaja frente a los sistemas jerárquico y encadenado es su sencillez, además de facilitar la construcción de búsquedas selectivas "a medida del usuario".

8.2.3. Análisis y transformaciones

Incluye cualquier operación que transforme las variables originales para un objetivo determinado. Las posibilidades son muy amplias: señalar corredores en torno a un polígono o línea; trazar la ruta óptima entre varios puntos; generar modelos digitales del terreno; calcular distancias, áreas y perímetros; superponer de formas diversas dos o más mapas (unión, intersección); realizar tablas de coincidencia espacial entre dos o más variables; ajustar mapas fronterizos; generalizar información; su-

[3]. Algunos ejemplos de programas para el trabajo en un SIG raster son: *MAP for the PC* (Tomlin, 1987); *OSU MAP for the PC* (Alvarez, 1988); *pMAP* (Berry, 1987); *IDRISI* (Eastman, 1988), *CRIES* (Schultink et al, 1989) y *SPANS* (TYDAC Tech, 1989). En formato vectorial los más destacados son *pcARC/INFO* (ESRI, 1987); MapInfo, Micro-Station y *AUTO-CAD Mapping Facilities*, aunque sólo el primero acoge en rango suficientemente amplio de funciones SIG (Parker, 1989). Todos estos programas pueden utilizarse sobre un ordenador personal, que admita el sistema operativo MS-DOS.

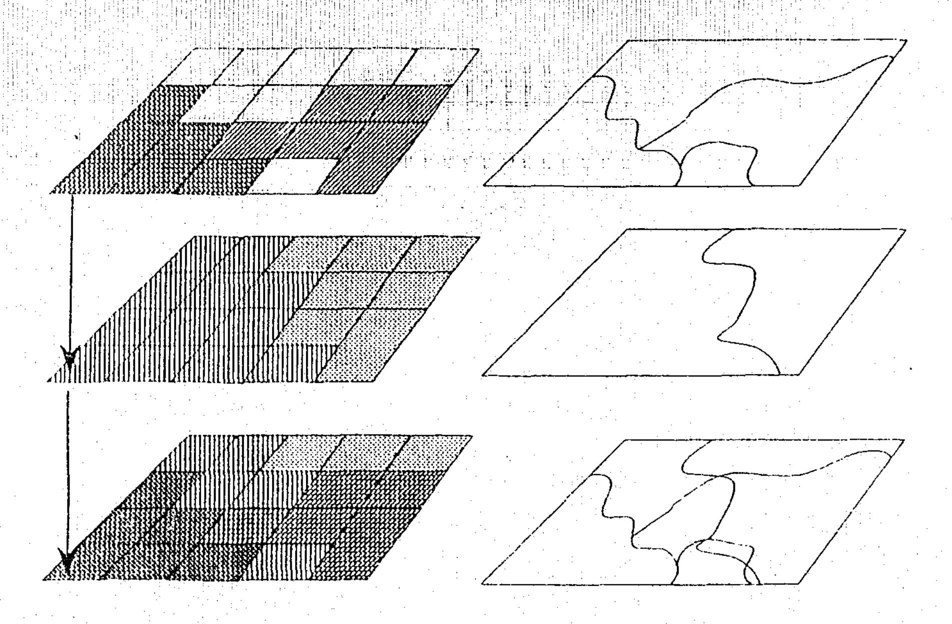


Fig. 8.7 - Superposición de variables a partir de estructuras vectoriales y teselares

primir polígonos inferiores a un umbral previamente fijado, y un largo etcétera. Cada una de estas funciones, además, puede ser germen de otras aplicaciones. Por ejemplo, el análisis topográfico pasa por generar un modelo digital del terreno, a partir del cual pueden realizarse otros análisis: estimación de pendientes y orientaciones, cálculo de perfiles, áreas vistas y ocultas, perspectivas tri-dimensionales, etc.

Este vasto abanico de posibilidades constituye una de las principales novedades de un SIG frente a las herramientas analíticas convencionales. La capacidad de cálculo de un ordenador permite abordar operaciones muy complejas o inaccesibles manualmente. En esta integración entre distintas variables espaciales puede hallarse un camino muy prometedor para una futura planificación, más eficaz, de los recursos que presenta un determinado territorio.

8.2.4. Representación visual

Un SIG permite aprovechar los numerosos periféricos de representación gráfica accesibles a un ordenador, facilitando la obtención de resultados en un formato de considerable calidad. Más arriba se

estudiaron los periféricos de salida gráfica más habituales (6.3.1.3). Todos ellos sirven como terminal gráfico para un SIG. La diferencia más significativa respecto a la teledetección es el empleo de trazadores gráficos (*plotters*), idóneos para la cartografía digital cuando se emplea un sistema de almacenamiento vectorial. Estos equipos están formados por un elemento móvil transversal y un rodillo, de giro perpendicular al primero, que consigue dirigir a una plumilla en la dirección deseada por el programa de dibujo. En definitiva no son más que estilógrafos automáticos, que dibujan el papel hacia las coordenadas que le dirige la máquina. En consecuencia, ofrecen una elevada calidad cuando se trata de representar líneas.

Si la estructura de almacenamiento elegida es teselar, será preciso acudir a otros medios de representación gráfica, como impresoras de distinto tipo, plotters electrostáticos y filmadoras láser. Para ambos tipos de almacenamiento, los monitores gráficos son el soporte más habitual de visualización.

Buena parte de la calidad de estas reproducciones gráficas se debe al tipo de programas de representación que incorpora el SIG. En este terreno, las posibilidades son también muy amplias. Puede optarse por una cartografía de isolíneas o de coropletas (fig. 8.8), por representaciones en tres dimensiones, en niveles de gris o utilizando una variada paleta de colores. Queda al usuario la elección del diseño último del mapa: localización de leyenda, escala gráfica, tipo de tramas o colores, rotulación, etc.

8.3. CONEXIÓN ENTRE LA TELEDETECCIÓN Y LOS SIG

De estos fases de trabajo, sin duda la más costosa y compleja es la que atañe a la entrada de datos. Todavía son muy numerosos los países que no cuentan con ningún tipo de cartografía digital: toda la información geográfica disponible está constituida por mapas en papel, de distintas escalas y proyecciones. La digitización de esta cartografía es una labor ardua y no exenta de problemas, tanto técnicos como económicos. Existen diversos métodos para convertir estos mapas a formato numérico, pero ninguno, hoy por hoy, es completamente satisfactorio. La codificación manual es lenta y tediosa, prácticamente nunca representa una solución operativa. El empleo de una mesa de digitización facilita la obtención automática de coordenadas, pero también resulta un proceso lento y laborioso, que requiere una detallada depuración de errores. La digitización automática mediante *scanner*, es el recurso más habitual para

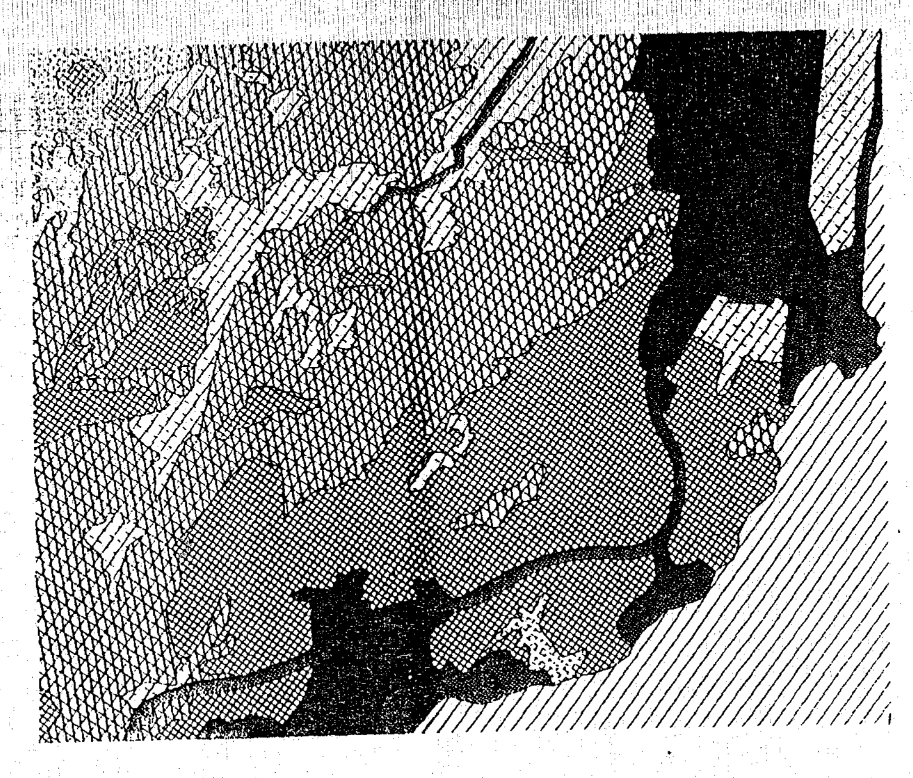


Fig. 8.8 - Ejemplo de representación gráfica de variables en un S.I.G.

organismos cartográficos de gran calibre. Sin embargo, precisa un importante trabajo de edición, para pulir posibles errores en la codificación de líneas o en la formación de la topología del mapa. Por último, las cámaras de video o los restituidores digitales, pueden cumplir misiones específicas, por ejemplo en la obtención del modelo digital del terreno, pero no resuelven otros problemas.

Además de la lentitud y elevado coste del proceso, la entrada de información en un SIG no está exenta de errores. Algunas fuentes de error habituales son: (i) el desfase temporal entre la fecha de obtención del documento y su almacenamiento en el SIG, (ii) inexactitudes en la digitización (polígonos mal etiquetados, desplazamiento de líneas, generalización de elementos), y (iii) falta de criterios homogeneos entre las personas que compilan la información base. Esto supone que la captación de las variables básicas, y su consiguiente actualización, sea los procesos más caros y complejos en un SIG. En este contexto puede

enmarcarse el aporte que la teledetección brinda a esta nueva tecnología. La capacidad de obtener documentos temáticos, a bajo coste y en un período de tiempo bastante cercano a la obtención de la imagen, contribuye a paliar dos problemas claves en cualquier SIG: la entrada y la actualización de datos. Obvia decir que el mapa obtenido a través de teledetección no está exento de errores -como ya se analizó en el capítulo anterior-, y que, por tanto, deberán éstos tenerse en cuenta para análisis posteriores con esa información. Ahora bien, cualquier tipo de cartografía incluye también errores, ya sean debidos a la interpretación, ya al desfase temporal entre la fecha de referencia y la de publicación del trabajo. Por ello, cualquier documento a introducir en un SIG debe incluir un proceso de depuración previo, que evite -o al menos reduzca, la entrada de información espúrea.

Esta conexión entre la teledetección y los SIG puede llevarse a cabo de distintas formas (fig. 8.9):

(i) Digitización de un mapa temático obtenido a partir de la interpretación visual de la imagen,
(ii) Digitización de un mapa temático obtenido a partir de la clasificación digital de la imagen.
(iii) Incorporar directamente el fichero generado por la clasificación digital de la imagen.
(iv) Incorporar al SIG los ND correspondientes a las bandas originales.

Resulta obvio que la tercera opción es la más conveniente, puesto que proporciona una variable temática al SIG obviando la tarea de digitización. Como ya vimos, la clasificación digital genera un fichero numérico, en donde el nuevo ND que define cada pixel indica la categoria a la que éste se asignó. Por tratarse de una información digital, la integración en un SIG resulta bastante sencilla. Los programas de corrección geométrica (6.5.3) permiten referenciar la clasificación al sistema de coordenadas definido para el SIG. En caso de que la clasificación ofrezca una mapa excesivamente fragmentado, conviene aplicar antes un filtro modal para generalizar los resultados (6.9.1.3).

La forma concreta de lleva a cabo esta integración depende, primordialmente, de la estructura de almacenamiento del SIG. Cuando se opta por una interpretación visual, las categorías deducidas de la imagen se definen por sus fronteras, por lo que el mapa resultante puede introducirse en un SIG de tipo vectorial. Asimismo, puede emplearse un programa de conversión vectorial a raster para conectarse con este tipo de formato. En ambos casos, resulta obligada la previa digitización del mapa, introduciendo tanto los polígonos que definen cada unidad temá-

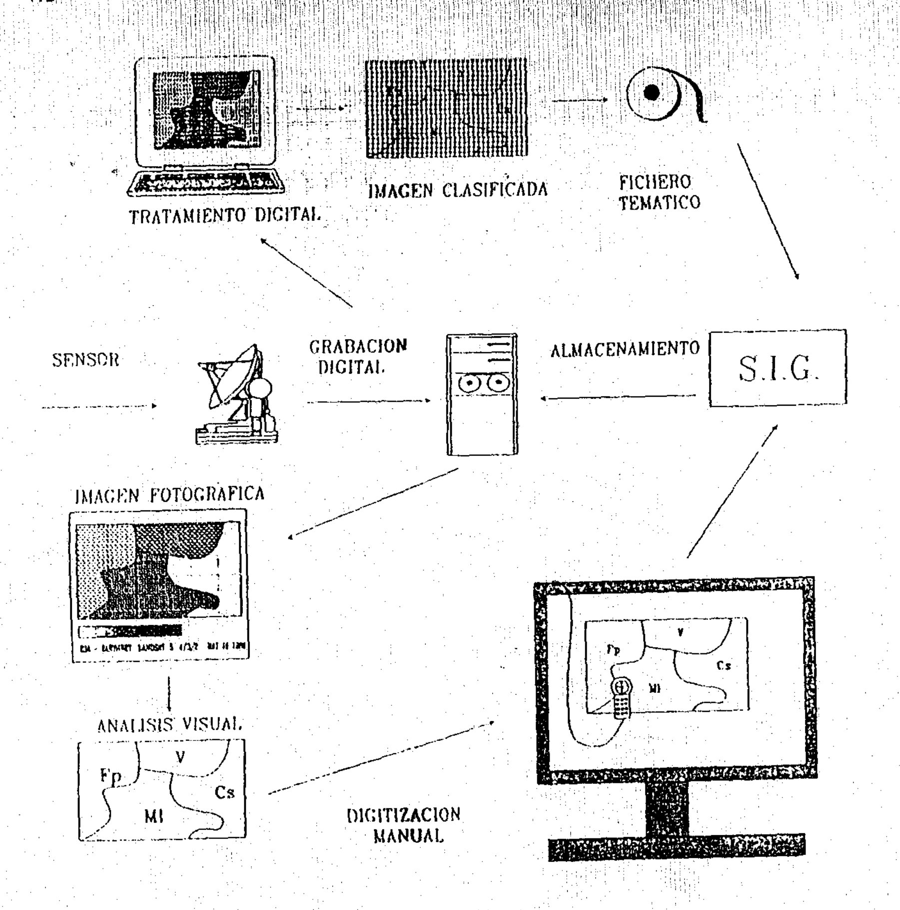


Fig. 8.9 - Conexión entre la teledetección y los S.I.G.

tica como la categoría a que pertenecen. En este sentido, la entrada de documentos es similar a la aplicable en el caso de cartografía convencional. Las ventajas de la teledetección frente a otras técnicas convencionales (como la fotografía aérea) se refieren a su mayor accesibilidad temporal y menores errores geométricos.

Si se abordó una clasificación digital de las imágenes, la conexión resulta mucho más directa. El pixel puede considerarse como la unidad teselar, por lo que una imagen clasificada ofrece los mismos rasgos de un formato raster. En caso de contar con un SIG de estas características, la entrada de datos es inmediata, una vez que la imagen clasificada se ajusta

al sistema de referencia elegido para el SIG (tipo de proyección y tamaño de la celdilla). En caso de trabajar con un SIG de tipo vectorial es preciso abordar la conversión raster a vectorial. Algunos sistemas de tratamiento digital de imágenes incorporan este tipo de algoritmos, si bien, suele tratarse de los equipos más costosos por la complejidad de los cálculos que esta operación implica. También existen algunos SIG que incorporan este tipo de programas. En cualquier caso, previamente a la conversión de formato, conviene generalizar severamente la clasificación digital, suprimiendo unidades temáticas de muy pocos pixels.

Además del aporte de la teledetección a un SIG, puede establecerse un flujo en sentido contrario, cuando variables almacenadas en un SIG se utilizan para mejorar la interpretación de la imagen. Ya tuvimos ocasión de estudiar este tipo de análisis en el contexto de la clasificación numérica (6.8.3.4.3). Los desarrollos más recientes tienden incluso a aplicar técnicas de análisis vectorial a la interpretación de la imagen: estratificación, reconocimiento de objetos, y empleo de sistemas expertos (Ehlers et al, 1989).

Independientemente de los problemas que pueda traer consigo, la conexión de la teledetección espacial con un SIG es, a nuestro juicio, la conclusión más lógica del empleo de esta técnica. Brinda enormes posibilidades para la realización de estudios ambientales, evaluación de recursos, análisis de impactos, modelos de localización, etc. Con el apoyo de estos sistemas informáticos, el estudioso del medio natural (o social) podrá preocuparse más del análisis que de la obtención de la información. Será posible diseñar alternativas para un proyecto, estimar comportamientos futuros, simular efectos antes de que éstos sean irreparables.

8.4. UN EJEMPLO DE CONEXIÓN TELEDETECCIÓN-SIG

Se presenta, como conclusión, una muestra de las posibilidades futuras que brindan estas tecnologías. El estudio comentado pretendía realizar una cartografía del riesgo de incendios, combinando distintas variables que resultan críticas para el inicio o la extensión del fuego (Chuvieco y Congalton, 1989). El área de estudio se situó sobre el litoral castellonense, que presenta -al igual que la práctica totalidad de la costa mediterránea- altos índices de riesgo para incendios forestales.

Previamente a la obtención del modelo, se estudiaron las variables más interesantes a incorporar a este SIG. En este sentido, se recogieron los criterios convencionales, señalando la vegetación como la variable

temática más significativa, por cuanto facilita una medida de la combustibilidad potencial del área. La cartografía de la cubierta vegetal se abordó a partir de la clasificación digital de una imagen TM, adquirida en 1984 (fig. 8.10*).

Cualquier modelo de riesgo debe también considerar la morfología del territorio. En nuestro caso, se intentaron incorporar tres variables decisivas en el comportamiento del fuego: altitud, pendiente y orientación. Las dos últimas pueden obtenerse a partir de la primera, para lo que resulta preciso generar un modelo digital del relieve. Este concepto refiere a una imagen digital, similar a las estudiadas en esta obra, si bien el ND de cada pixel indica su altitud. La estructura de almacenamiento es muy similar a una imagen de satélite, aunque suelen codificarse en 16 bits (65.536 niveles) para recoger cualquier rango altitudinal. En este caso, el MDT se generó a partir de la cartografía nacional del área de estudio (escala 1:50.000). A partir de las coordenadas de las curvas de nivel, se obtuvo, por interpolación sucesiva, una malla geométrica con elevaciones. La superposición entre esos datos y la imagen original se realizó gracias a programas de corrección geométrica, transformando el modelo digital a la misma resolución de la imagen, 30 x 30 m (fig. 8.11*). A partir del modelo digital del terreno se obtuvo la pendiente y la orientación, dos nuevas capas de información registradas a las dos anteriores.

La quinta variable introducida en el sistema pretendía valorar, de alguna forma, el riesgo asociado a la actividad humana. Entre los criterios posibles, seleccionamos la proximidad a vías de comunicación, suponiendo que a través de esos ejes se utiliza más fácilmente el bosque como espacio de recreo, con el consiguiente riesgo que esto lleva consigo. Puesto que esa penetración no es igual a través de carreteras que de pistas forestales, se procedió a digitizar ambos elementos por separado, señalándose un corredor de mayor riesgo a 50 m de cada carretera ó 150 m de cada camino rural. Los polígonos que cumplían una de las dos condiciones formaron el área asociada a riesgo humano (fig. 8.12). Para garantizar una mayor precisión geométrica, estos análisis de proximidad se realizaron sobre un SIG vectorial, convirtiendo a formato raster el resultado.

Por último, se derivó un índice de riesgo de incendio, combinando las cinco variables en un sólo mapa. Cada una de ellas se ponderó de acuerdo a su importancia en el inicio o desarrollo del incendio. La jerarquía resultante fue: vegetación, pendiente, orientación, proximidad a vías y

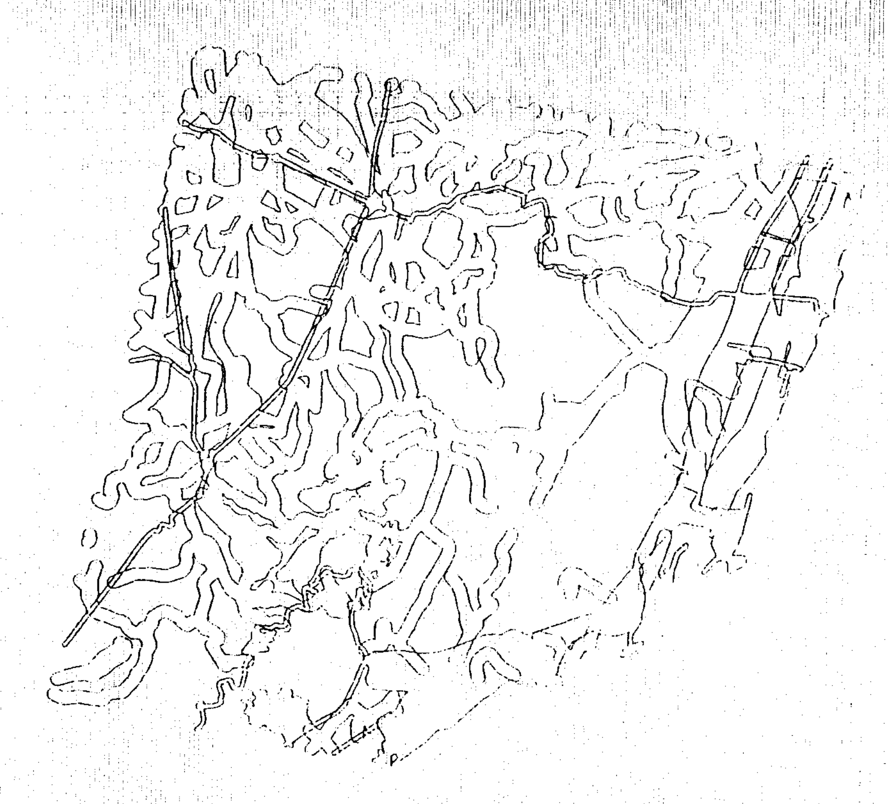


Fig. 8.12 - Superposición de áreas de riesgo a partir de carreteras y pistas forestales

altitud. Este tipo de metodologías permite cartografiar el índice final para todo el área de estudio, ya que no se construye a partir de datos puntuales (estaciones meteorológicas, por ejemplo), sino de información completa sobre el territorio. De ahí su interés para la planificación de recursos o la realización de quemas controladas. Por cuanto el área analizada sufrió un importante incendio forestal en 1985 (fig. 8.13), el modelo resultante pudo contrastarse con las consecuencias reales del fuego. Si bien se pretendía sólo presentar una metodología de trabajo, los resultados parecieron avalar el intento puesto que el 22 % de los pixels calificados como de alto riesgo fueron quemados, mientras sólo un 3,4 % de los calificados como bajo riesgo.

Esto es sólo un ejemplo de las posibilidades que brindan estas nuevas tecnologías al estudioso del medio ambiente. En éste, como en los capítulos previos, sólo se ha pretendido iniciar al lector, suscitar su

curiosidad e interés. Al final de estas páginas comienza el objetivo para el que fueron escritas: iniciar una senda que esperamos sea para todos fructífera.

APENDICE I: FUENTES ADICIONALES DE INFORMACION

1. Centros internacionales dedicados a teledeteccion espacial

. *Canadian Remote Sensing Training Institute*, P.O. Box 8321, Ottawa Terminal, Ottawa, Ontario K2P 3H8.

. *Deutsche Forschungs und Versuchsanstalt für Luft und Raumfahrt* (DFVLR), D-8031 Oberpfaffenhofen, Federal Republic of Germany.

. *EROS Data Center*, National Mapping Division, Sioux Falls, SD 57198, USA.

. *European Space Agency*, 8-10 rue Mario Nikis, F-75738 Paris Cedex 15, Francia.

. *Goddard Space Flight Center*, Greenbelt, MD 20771, USA.

. *Groupement pour le Dévelopment de la Télédétection Aérospatial* (GDTA), Centre Spatiale de Toulouse, 18 Avenue Edouard Belin, F-31055 Toulouse.

. *Institute for Remote Sensing Applications*, EEC-Joint Research Center, JRC-Ispra Site, 21020 Ispra, Varese, Italia.

. *Jet Propulsion Laboratory*, California Institute of Technology, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA91103, USA.

. *National Remote Sensing Agency*, Balanagar, Hyderabad-500 037, India.

. *National Remote Sensing Center*, Space Department, Royal Aircraft Establishment, Farnborough, Hampshire GU14 6TO, Reino Unido.

. *Remote Sensing Technology Center of Japan*, University-Roppongy Building, 7-15, Minato Ku, Tokyo 106, Japón.

2. Centros iberoamericanos dedicados a teledetección espacial

. *Agencia de Medio Ambiente, Junta de Andalucia*, Avda. Eritaña 2, 41013 Sevilla.

. *Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos* (CLIRSEN), Apartado 8216, Quito, Ecuador.

. *Centro Interamericano de Fotointerpretación*, Carrera 30 No. 47-A57, Apartado aéreo 53754, Bogotá D.E., Colombia.
. *Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales* (CNIE), Centro de Teleobservación, Avda. del Libertador 1513, Buenos Aires, Argentina.
. *Institut Cartogràfic de Catalunya*, Balmes 209-211, 08006 Barcelona.
. *Instituto de Economía y Geografía Aplicada*, Pinar 25, 28006 Madrid.
. *Instituto Geográfico Nacional*, Sección de Teledetección, General Ibañez de Ibero, s/n. 28003 Madrid.
. *Instituto de Geología Jaume Almera*, Martí i Franqués s/n, 08028 Barcelona.
. *Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias*, Sección de Teledetección, Ctra. Coruña km 7, 28040 Madrid.
. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* (INPE), P.O. Box 515, Sao José dos Campos - SP, Estado de Sao Paulo, Brasil.
. *Instituto Tecnológico Geominero de España*, Sección de Teledetección, Rios Rosas 23, 28003 Madrid.
. *Pontificia Universidad Católica de Chile*, Programa de Percepción Remota, Casilla, 6177-22, Santiago, Chile.
. *Universidad de Alcalá de Henares, Departamento de Geografía*. Calle de los Colegios 2, 28801 Alcalá de Henares.
. *Universidad Politécnica de Canarias, Facultad de Ciencias del Mar*, Apdo. 550, 35200 Las Palmas.
. *Universidad de Valencia, Departamento de Termología. Facultad de CC.Físicas*. 46100 Burjassot, Valencia.

3. Sociedades Profesionales

. *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, 210 Little Church Falls Street, Falls Church, VA 22046, USA.
. *Asian Association on Remote Sensing*, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 7-32 Roppongi, Minatoku, Tokyo, Japón.
. *Asociación Española de Teledetección*, Paseo del Pintor Rosales 34, 28008 Madrid.
. *Canadian Remote Sensing Society*, 222 Somerset Street West, Suite No. 601, Ottawa, Ontario K2P 0J1, Canada.
. *European Association of Remote Sensing Laboratories*, EaRSEL Secretariat, 148, rue du Fg. St Denis, P.O. Box 60, F-75462 Paris Cedex 10, Francia.
. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Department of Photogrammetry, S-100 44 Stockholm, KTH, Suecia.
. *Remote Sensing Society*, Department of Geography, University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, Reino Unido.

. *Sociedad de Especialistas Latinoamericanos en Percepción Remota* (SELPER), Avda. del Libertador 1513, C.P. 1638, Vicente López, Pcia. de Buenos Aires, Argentina (sede para 1989-1991).

4. Revistas especializadas en teledetección

. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Canadian Remote Sensing Society, 222 Somerset Street West, Suite No. 601, Ottawa, Ontario K2P 0J1, Canada.
. *Geocarto International*, Geocarto International Centre, GPO Box 4122, Hong Kong.
. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 345 E. 47th Street, New York, NY, 10017 USA.
. *International Journal of Remote Sensing*, Taylor and Francis Ltd., Rankine Road, Basingstoke, Hampshire RG24 0PR, Reino Unido.
. *ITC Journal*, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, P.O. Box 6, NL-7500 AA, Enschede, Holanda.
. *Photogrammetria*, Elsevier Scientific Publishing Company, Box 211, NL-1000 AE Amsterdam, Holanda.
. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 210 Little Falls Church Street, Falls Church, VA 22046, USA.
. *Photointerprétation*, Editions Technip, 27 rue Ginoux, F-75737, Paris Cedex 15, Francia.
. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier Science Publishing Company Inc., 52 Vanderbilt Avenue, New York, NY 10017, USA.
. *Remote Sensing Quartely*, University of Nebraska at Omaha, Omaha, Nebraska 68182.
. *Remote Sensing Reviews*, Harwood Academic Publishers, 50 W. 23rd Street, New York, NY 10010, USA.
. *Soviet Journal of Remote Sensing*, Harwood Academic Publishers, 50 W. 23rd Street, New York, NY 10010, USA.

5. Recopilaciones bibliográficas

. *Earth Resources: A Continuing Bibliography with Indexes*, NASA, U.S. National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., 20546, USA.
. *Geographical Abstracts, G: Remote Sensing, Photogrammetry and*

Cartography, Geo Abstracts Ltd., Regency House, 34 Duke Street, Norwich NR3 3AP, Reino Unido.

. GEOBASE, Geo Abstracts Ltd. (base de datos informatizada).

. *Remote Sensing of Natural Resources: A Quartely Literature Review*, University of New Mexico, Technology Application Center, Alburquerque, NM 87131, USA.

. RESORS (*Remote Sensing Online Retrieval System*), Canada Center for Remote Sensing, Department of Energy, Mines and Resources, 2464 Sheffield Road, Ottawa, Ontario K1A 0Y7, Canadá.

6. Centros docentes

. *Carnegie Laboratory of Physics, University of Dundee*, Dundee DD1 4HN, Scotland, Reino Unido.

. *Center for Remote Sensing, Imperial College of Science and Technology, Department of Physics*, Prince Consort Road, London SW7 2AZ, Reino Unido.

. *Groupement pour le Dévelopment de la Télédétection Aérospatial* (GDTA), Centre Spatiale de Toulouse, 18 Avenue Edouard Belin, F-31055 Toulouse.

. *International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences* (ITC), P.O. Box 6, NL-7500 AA, Enschede, Holanda.

. *Institute for Environmental Studies, University of Winsconsin-Madison*, 40 Science Hall, 550 N.Park Street. Madison, WI 53706, USA.

. *Laboratory for Applications of Remote Sensing (LARS), Purdue University*, Entomology Building, Room 214. West Lafayette, IN 47907, USA.

. *Laboratory for Remote Sensing and Mapping Science*. Department of Geography, University of Georgia. Athens, GA 30602, USA.

. *Remote Sensing Unit*. Department of Geography, University of Nottingham. University Park, Nottingham NG7 2RD, England.

. *Technology Application Center, University of New Mexico*, 2500 Central SE, Alburquerque, NM 87131, USA

. *Universidad de Alcalá de Henares, Departamento de Geografía*. Calle de los Colegios, 2. 28801 Alcalá de Henares.

. *Universidad Politécnica de Canarias, Facultad de Ciencias del Mar*, Apdo. 550, 35200 Las Palmas.

. *Universidad de Valencia, Departamento de Termología. Facultad de CC.Físicas*. Burjassot, Valencia.

7. Organismos dedicados a la distribución de imágenes

. *EOSAT (Earth Observation Satellite Company)*, 4300 Forbes Boulevard, Lanham, MD 20706, USA. Representante español: Ibersat, Velázquez 24 - 5º, 28001 Madrid.

. *CONIE-NPOC* (representante español de la red europea EARTHNET), Paseo del Pintor Rosales 34, 28008 Madrid.

. *NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)*, NESDIS, World Weather Building, Room 100, Washington, D.C. 20233, USA.

. *SOJUZKARTA*, 45 Vovgogradski Pr., Moscow 109 125, Unión Soviética.

. *SPOT-Image*, 16 bis avenue Edouard Belin, F-31030 Toulousse Cedex, Francia. Representante español: Aurensa, San Francisco de Sales 38 - 1º, 28003 Madrid.

8. Empresas dedicadas a la fabricación de equipos de tratamiento digital de imágenes

. Decision Images, Inc., 1000 Herrontown Road, Princeton, NJ 08540. Diseña un equipo basado sobre PC, de fácil manejo y buenas prestaciones. Representante español: Ambimed, S.A., Velázquez 119 - 5º A, 28006 Madrid.

. DIPIX Tecnologies Inc., The Baxter Center, 1050 Baxter Road, Ottawa, Ontario K2C 3P1. Canadá. Fabrica principalmente equipos sobre minis o estaciones de trabajo.

. DRAGON, Six University Drive Suite 213, Amherst, MA 01002, USA. Cuenta con un programa de tratamiento digital para ordenador personal (con adaptador de gráficos VGA). Idóneo para tareas docentes.

. ERDAS, 430 Tenth Street, N.W., Suite N206, Atlanta, GA 30318. Cuenta con equipos basados sobre PC y estaciones de trabajo. El rango de aplicaciones es muy variado, incluyendo S.I.G. y análisis tridimensionales. Representante español: Infocarto, Núñez de Balboa 115 - 2º J, 28006 Madrid.

. Intergraph, primariamente es una empresa dedicada a la cartografía digital y los S.I.G., pero ha incorporado recientemente opciones para el tratamiento digital (serie Tigris).

. International Imaging Systems (IIS), 1500 Buckeye Drive, Milpitas, CA 95035-7484. Fabrica equipos de altas prestaciones, sobre minis, incorporando procesadores de imagen de diseño propio.

. LANDSAT, Mj. Scot A. Loomer, 94-037 Kuahelani Avenue #117, Mililani, Hawaii 96789. Distribuye un programa de dominio público para ordenador personal (con adaptador de gráficos EGA). Adecuado para la enseñanza introductoria.

. MICROM, Bertran 35, 08023 Barcelona. Unica empresa española que fabrica software para el tratamiento digital de imágenes en teledetección. Aunque de reciente diseño, aporta una buena gama de aplicaciones, tanto sobre PC como estaciones de trabajo, acopladas a procesadores de imagen Comtal.

. Terra-Mar, 1937 Landings Drive, Mountain View, CA 94043, USA. Principalmente desarrollado sobre PC. Incluye funciones S.I.G.

APENDICE II: GLOSARIO

ABSORCION ATMOSFERICA (2.8): Indica la eliminación que realiza la atmósfera de distintos tipos de energía, en razón de sus propios componentes, y principalmente del ozono, oxígeno atómico y vapor de agua. *ABSORPTION*

ACTIVO, SISTEMA (3.4): Se habla de sensores activos, cuando son capaces de emitir sus propias ondas electro-magnéticas, y grabar posteriormente el haz reflejado por el objeto bajo estudio. *ACTIVE SYSTEMS*

ALBEDO (2.5): Ver reflectividad.

ALETEO (6.5): Es la consecuencia de la rotación de una plataforma sobre su eje longitudinal. *ROLL*

ANOTACIONES (6.4): Diversos elementos gráficos que son incorporados al tratamiento de las imágenes para mejorar su legibilidad.

APERTURA (3.3): Se habla de apertura de un sistema óptico por la relación entre la luz que deja pasar un diafragma y la que obstruye.

BANDA ESPECTRAL (2.2): Se refiere este término a una selección de longitudes de onda con comportamientos electro-magnéticos similares. *SPECTRAL BAND*

BARRIDO MULTIESPECTRAL, Equipos de (3.3.2): Se trata de equipos sensores que permiten explorar secuencialmente la superficie de la Tierra, dividiendo la radiación captada en diversas bandas espectrales. *MULTISPECTRAL SCANNER*

BIT (6.3): Refiere a un dígito del sistema binario.

BYTE (6.3): Un grupo de ocho bits de datos numéricos.

CABECEO (6.5): Ocurre cuando una nave espacial se inclina a lo largo de su eje de vuelo. *PITCH*

CALIBRACIÓN (2.3): Proceso de comparar ciertas medidas específicas con otro instrumento estándar. *CALIBRATION*

CÁMARA MULTIBANDA (3.3.1): Cámara que expone diferentes áreas a un film, o a más de un film, a través de una lente. Incluye diferentes objetivos, cada uno de los cuales presenta diversos filtros o tipos de película, de tal forma que puede obtenerse la misma porción del terreno en diferentes bandas espectrales. *MULTIBAND CAMERA*

CÁMARA DE GRAN FORMATO (3.3.1): Se trata de un cámara que permite obtener negativos sobredimensionados, 23 x 46 cm, en lugar de los estándar, 23 x 23 cm. *LARGE FORMAT CAMERA, LFC*

CAMPO INSTANTÁNEO DE VISIÓN (3.2): Este término expresa el ángulo exacto de visión que es detectado en cada pauta de observación en un sistema de exploración electrónica. Normalmente se mide en grados o micro-radianes y se relaciona con la superficie real abarcada por el detector. *INSTANTANEOUS FIELD OF VIEW, IFOV*

CATODICOS, **Tubos de rayos** (6.3): Un tubo en el vacío capaz de producir imágenes en Blanco y Negro o Color, mediante el choque de electrones sobre una superficie sensibilizada. *CATHODE RAY TUBE, CRT*

CINTAS COMPATIBLES CON ORDENADOR (6.3): Cintas magnéticas que contienen datos digitales. Son el soporte más habitual de las imágenes de satélite. *COMPUTER COMPATIBLE TAPE, CCT*

CLASIFICACION DIGITAL (6.8): Proceso por el que se asigna un pixel de una imagen multi-espectral a una de las categorías de la leyenda, generalmente sobre la base de similitudes entre los valores numéricos que las definen. *PATTERN RECOGNITION, DIGITAL CLASSIFICATION*

CLUSTER (6.8): Se habla de cluster o conglomerado cuando los pixels o elementos de una imagen tienden a formar grupos con similares condiciones espectrales. El agrupamiento automático no supervisado (*clustering*) pretende encontrar estos grupos espectrales idóneos como reflejo de los naturalmente existentes en la imagen.

COMPONENTES PRINCIPALES (6.7.3): Es una técnica de tratamiento estadístico que permite condensar una serie de variables en un menor número sobre la base de sus correlaciones mutuas. *PRINCIPAL COMPONENTS*

CONDUCCION (2.1): La transferencia de energía electromagnética a través de un material por interacción molecular. *CONDUCTION*

CONTRASTE (6.6.1): Diferencia de valor o tono entre las áreas más claras y más oscuras de una imagen. *CONTRAST*

CORRECCIONES (6.5): Indican las operaciones digitales tendentes a dotar a la imagen de las características idóneas para la clasificación. Estos procesos pueden dividirse en: correcciones radiométricas y geométricas.

CUERPO NEGRO (2.6): Se trata de un emisor ideal, que radia el máximo de energía por unidad de superficie en cada longitud de onda y para un temperatura dada. Un cuerpo negro también absorbe toda la energía que sobre él incide. *BLACK BODY*

DATOS AUXILIARES (6.8): Medidas y observaciones acerca de los objetos, áreas o fenómenos que serán captados por algún medio de teledetección. Pueden ser mapas de ocupación del suelo, calidad del suelo, análisis químicos, fotografía aérea, etc. *DATA REFERENCE*

DENSIDAD, **Intervalos de** (6.6): Indica el proceso de convertir el tono continuo de una imagen en una serie de intervalos de densidad, cada uno de los cuales corresponde a un rango digital especifico. *DENSITY SLICING*

DIGITIZACION (6.3): El concepto refiere a cualquier conversión de un documento analógico (fotografía aérea, mapa convencional) en formato numérico. *DIGITIZING*

DISTORSIÓN PANORAMICA (6.5): Se produce en los sistemas de barrido por un efecto de diferenciación de escala, en la línea perpendicular a la línea de vuelo.

DOPPLER, **Efecto** (3.4): La variación en la frecuencia de una señal, debido al movimiento del transmisor. *DOPPLER SHIFT*

ELECTRO-MAGNÉTICA, **Energía** (2.1): Energía propagada a través del espacio o de otro medio material en un modelo armónico ondulatorio con

un componente magnético y otro eléctrico. *ELECTRO-MAGNETIC ENERGY*

EMISIVIDAD (2.6): Es una medida relativa que describe la habilidad de un cuerpo para emitir energía en comparación a cómo la emiten los cuerpos negros. *EMISSIVITY*

ESPECTRO ELECTRO-MAGNÉTICO (2.2): Este término hace referencia a la localización de las distintas radiaciones según su longitud de onda y frecuencia. *ELECTRO-MAGNETIC SPECTRUM*

FILTROS ATMOSFÉRICOS (2.8): Cualquier material que ya por absorción o por reflexión modifica selectivamente la radiación transmitida a través de la atmósfera. Los más destacados son el oxígeno (atómico y molecular), ozono, dióxido de carbono, monóxido de carbono y vapor de agua.

FILTROS DIGITALES (6.6): Se trata de matrices de coeficientes numéricos que permiten atenuar o acentuar -según su finalidad y estructura- las gradaciones radiométricas presentes en los datos originales. *DIGITAL FILTERS*

FRECUENCIA (2.1): Número de ciclos por segundo que pasan por un punto fijo. *FREQUENCY*

GAUSIANA, Distribución (6.8): Término estadístico que refiere a la disposición de las frecuencias observadas en una variable como ajustadas a la curva normal. *GAUSSIAN DISTRIBUTION*

HISTOGRAMA (6.4.2): Una representación gráfica de las frecuencias observadas en una determinada imagen. *HISTOGRAM*

IMAGEN (3.3): Cualquier forma de representación pictórica de los datos no obtenida por medios fotográficos. *IMAGE*

INERCIA TÉRMICA (2.6): Es la medida de la respuesta de un material a los cambios de temperatura. *THERMAL INERTIA*

INFRARROJO (2.2): Porción del espectro comprendida entre 0,7 y 100 micras, que tiene gran importancia para estudios de teledetección. Normalmente suele dividirse en infrarrojo cercano (0,7 - 1,3 micras), medio (1,3 - 3,0 micras) y lejano (7,0 a 15,0 micras). Este último también se conoce como infrarrojo térmico. *INFRARED*

INFRARROJO COLOR (5.2): Se trata de una composición coloreada en la cual se aplican a las bandas espectrales verde, roja e infrarrojo próximo, los colores naturales azul, verde y rojo, respectivamente. Resulta muy útil para detectar cambios en las condiciones de las superficies vegetales. *COLOR INFRARED*

LAMBERTIANA, Superficie (2.5): Indica un perfecto difusor, que refleja la energía incidente, por igual, en todas las direcciones. *LAMBERTIAN*

LANDSAT (3.5.1): Serie de satélites construida por NASA dedicados específicamente a la detección de recursos naturales.

LÍDAR (3.4.2): Se trata de un sensor activo que trabaja con luz polarizada o láser.

LONGITUD DE ONDA (2.1): Es la medida de la distancia que separa dos valores culminantes entre sucesivas ondas. *WAVELENGTH*

MÁXIMA VEROSIMILITUD (6.8.3): Es un criterio estadístico de clasificación digital de imágenes, por el cual se asigna cada pixel de la imagen a la categoría para la cual posee mayor probabilidad de pertenencia. *MAXIMUM LIKELIHOOD*

MICRO-DENSITOMETRO: Es un instrumento capaz de traducir un escala de grises a formato digital, mediante la medida de la densidad del film. *MICRO-DENSITOMETER*

MICRÓMETRO (2.3): Unidad de longitud empleada para medir longitudes de onda de alta frecuencia. Equivale a la millonésima parte de un metro. *MICROMETER*

MICRO-ONDAS (2.7): Porción del espectro electromagnético comprendida entre 1 mm y 1 m. *MICROWAVE*

MIE, Dispersión (2.8.2): Tipo de difusión atmosférica provocada por partículas con similares dimensiones a la longitud de onda de la radiación. *MIE SCATTERING*

MOSAICOS (6.5): Se trata de un ensamblaje de distintas imágenes aéreas o espaciales que cubren parte, al menos, del mismo territorio.

NIVEL DIGITAL (6.1): Valor entero que traduce numéricamente la

intensidad radiométrica recibida por un sensor óptico-electrónico. *DIGITAL NUMBER, PIXEL VALUE.*

ORIENTACIÓN ANGULAR (6.5): Menciona la orientación de un sistema de teledetección con respecto a una referencia geográfica. *ATTITUDE*

ORTO-FOTOGRAFÍA (3.3.1): Fotografía corregida de las distorsiones del relieve. *ORTOPHOTOGRAPHY*

PASIVO, Sistema (3.3): Un sistema sensor que detecta la radiación emitida desde el objetivo o reflejada por él. *PASIVE SYSTEMS*

PIXEL (3.3): Derivado del inglés "*picture element*". Es el elemento pictórico más pequeño de las imágenes que es susceptible de ser procesado.

PUNTOS DE CONTROL (6.5): Se trata de elementos geográficos que pueden ser localizados precisamente en una imagen y en un mapa para ser empleados en la corrección cartográfica de dicha imagen. *GROUND CONTROL POINT, GCP*

RÁDAR (3.4.1): Sistema activo de micro-ondas que emite un haz energético sobre la superficie terrestre para luego recoger su reflexión sobre ella. Existen dos tipos de rádar: el lateral (SLAR), y el de apertura sintética (SAR).

RADIACIÓN (2.1): El proceso en el que la energía electromagnética es propagada a través del espacio libre.

RADIANCIA (2.3): Total de energía radiada por unidad de área y por ángulo sólido de medida. *RADIANCE*

RADIOMETRO DE MICROONDAS (3.3.5): Es un instrumento para medir la energía radiada por las superficies con una longitud de onda de milímetros o centímetros. *MICROWAVE RADIOMETER*

RAYLEIGH, Dispersión (2.8.2): Se produce por partículas atmosféricas mucho más pequeñas en tamaño que la longitud de onda de la radiación. *RAYLEIGH SCATTERING*

REALCE DE IMÁGENES (6.6): Procesos digitales que tienen como fin facilitar la mejora visual de la imagen, mediante el aumento del contraste interno o la creación de nuevas bandas que ilustren mejor sobre sus

características originales. *ENHANCEMENT*

REALCE DE BORDES (6.6.6): Proceso particular de realce que tiene como objetivo enfatizar las áreas de transición en una imagen. *EDGE ENHANCEMENT*

REFLECTIVIDAD (2.5): Porcentaje de radiación incidente que es reflejada por una superficie bidimensional. *REFLECTANCE*

RESOLUCIÓN (3.2): La resolución es la medida de la habilidad de un sistema sensor para discriminar información dentro de la imagen. *RESOLUTION*

RUIDOS ATMOSFÉRICOS (6.5): Refiere este término a las interferencias imprevistas y más o menos aleatorias que introducen una degradación en los datos originales. *ATMOSPHERIC NOISE*

RUIDO DE LA ESCENA (3.2.1): Concepto que refiere a la variabilidad espectral hallada en el interior de las distintas clases temáticas. *SCENE NOISE*

SENSOR: Cualquier instrumento que detecta energía (principalmente electromagnética), la convierte en una señal y la presenta en forma susceptible de ser aprovechada para el estudio del medio ambiente.

SIGNATURA ESPECTRAL (2.5): Es la expresión de un objeto sobre una imagen que nos permite reconocerlo. Las signaturas están afectadas por las características del objeto que originan su interacción con la energía electro-magnética, y son distintas según las longitudes de onda. *SPECTRAL SIGNATURE*

SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) (8): Conjunto de programas que permiten almacenar, modificar y relacionar cualquier tipo de información espacial. *GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS (GIS)*

SUAVIZADO DE IMÁGENES (6.6): Operación digital que tiene por objeto obtener una mayor generalización en los resultados.

TELEDETECCION (1.1): Es la técnica que permite obtener información sobre un objeto, área o fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos por un instrumento que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación. *REMOTE SENSING*

TERMOGRAFIA (2.7): La termografía es la rama de la teledetección que se ocupa de la medición de la temperatura radiada por los fenómenos de la superficie de la Tierra desde una cierta distancia. *THERMOGRAPHY*

TESELAR, Estructura (8.2.2): Sistema de almacenamiento de datos en un SIG que parte de dividir el terreno en una serie de celdillas regulares, sobre las que se codifican las distintas variables que integran el sistema. *GRID-Based GIS*

THEMATIC MAPPER (3.5.1): Se trata de un equipo de barrido multiespectral bastante sofisticado, que se incorpora a los satélites de recursos naturales Landsat-4 y 5.

VECTORIAL, Estructura (8.2.2): Forma de almacenamiento de datos en un SIG, en el cual las distintas unidades temáticas se definen por las coordenadas de sus bordes. Una descripción topológica asociada a esa información gráfica permite reconstruir, posteriormente, las variables temáticas asociadas a esos polígonos. *VECTOR-Based GIS*

VENTANAS ATMOSFERICAS (2.8): Aquellas porciones del espectro en las cuales la atmósfera ofrece poca atenuación a la radiación electromagnética. *ATMOSPHERIC WINDOW*

VERDAD TERRENO (6.8): Refiere a todas las medidas de magnitudes físicas y muestreos llevados a cabo sobre el área materia de operación. *GROUND TRUTH*

VIDICON, Sistema (3.3.4): Es un tubo electrónico sensor de imágenes en el cual la imagen es recibida y alimentada sobre la superficie de un fotoconductor que sostiene el barrido electrónico. *RETURN BEAM VIDICON*

VISUALIZACIÓN DE DATOS (6.6): Cualquier representación visual de imágenes digitales. Puede realizarse sobre un monitor de rayos catódicos, un plotter electrostático, plotter de láser o impresora de líneas. *DISPLAY*

BIBLIOGRAFIA

(Indice de autores y obras citados)

Adeniyi, P.O: *Using remotely sensed data for census surveys and population estimation in developing countries: examples from Nigeria*, "Geocarto International", vol. 2 (1987), pp. 11-32.

Alía, M., C.Martín, A.G.Ubanell y L.Muñoz: *Determination by means of Landsat images of different geological structures in the central areas of the Iberian Plateau*, en R. Núñez, Ed, Thematic Mapping, Land Use, Geological Structure and Water Resources in Central Spain, Madrid (1976), NASA Project 28760, pp. 172-208.

Allan, T.D., Ed.: *Satellite Microwave Remote Sensing*, New York, Ellis Howard.

Alvarez, V.J.: *MAP Analysis Package. Versión 1.0 para PC*, Columbus (1988), Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica de la Univ. Estatal de Ohio.

Anderson, J.R., E.E.Hardy, J.T.Roach y R.E.Witmer: *A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data*, Washington, D.C. (1976), U.S.Geological Survey Prof. Paper 964.

Anderson, J.R: *Land use classification schemes*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 37 (1971), pp. 379-387.

Arbiol, R., M.T.Muns, J.Romeu y O.Viñas: *Estudi de la simulació SPOT sobre Catalunya*, "Revista Catalana de Geografia", vol. 1 (1985), pp. 26-44.

Arbiol, R., V.Pala y J.Romeu: *Ortofotomapa de Catalunya en falso color 1:50.000*, en R.Núñez, F.Fourneau, Eds, Coloquio Hispano-Francés sobre Teledetección y Planificación Integrada del Territorio, Madrid (1989), I.G.N., pp. 195-200.

Aronoff, S: *Classification accuracy: A user approach*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 48 (1982), pp. 1299-1307.

Astaras, T., y N.Silleos: *Land classification of part of central Macedonia (Greece) by the use of remote-sensing techniques*, "International Journal of Remote Sensing", vol. 5 (1984), pp. 289-302.

Atkinson, P., J.L.Cushnie, J.R.G.Townshend y A.Wilson: *Improving Thematic Mapper land cover classification using filtered data*, "International Journal of Remote Sensing", vol. 6 (1985), pp. 955-961.

Barret, E.C. y L.F.Curtis: *Introdution to Environmental Remote*

Sensing, London (1982), Chapman & Hall.
Barret, E.C: *Climatology from Satellites*, London (1974), Methuen.
Beaven, P.J: *A very low-cost microcomputer-based image processor*, en J.P.Muller, Ed, Digital Image Processing in Remote Sensing, London (1988), Taylor & Francis, pp. 123-133.
Beer, J.S., K.Sijmons y H.Weinreich: *Intensity and colour coding of relief and ground cover on PC transformed Landsat data*, "ITC Journal", vol. 78-2 (1978), pp. 347-352.
Benson, A.S. y S.Degloria: *Interpretation of Landsat-1 Thematic Mapper and Multispectral Scanner data for forest surveys*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 51 (1984), pp. 1281-1289.
Berry, B.J. y A.M.Baker: *Geographic Sampling*, en B.J.Berry y D.F. Marble, Spatial Analysis, Englewood Cliffs (1968), Prentice Hall, pp. 91-100.
Berry, J.K: *Academic Map Analysis Package (aMAP). Workshop Workbook*, New Haven (1987), Yale University, School of Forestry and Environment Studies.
Bishop, Y.S. y P.Holland: *Discrete Multivariate Analysis. Theory and Practice*, Cambridge (1975), MIT Press.
Blom, R.G. y M.Daily: *Radar image processing for rock-type discrimination*, "IEEE Transactions on Geoscience Electronics", vol. GE20 (1982), pp. 343-351.
Booth, D.J. y R.B.Oldfield: *A comparison of classification algorithms in terms of speed and acuracy after the application of a post-classification modal filter*, "International Journal of Remote Sensing", vol. 10 (1989), pp. 1271-1276.
Brachet, G: *SPOT: The first Operational Remote Sensing Satellite*, en K.H.Szekielda, Ed, Satellite Remote Sensing for Resources Development, London (1986), Graham and Trotman Ltd, pp. 59-80.
Braun, H.M. y G.Rausch: *Present status of microwave remote sensing from space with respect to natural resources monitoring*, en K.H.Szekielda, Ed, Satellite Remote Sensing for Resources Development, London (1986), Graham and Trotman, pp. 23-58.
Bronsveid, M.C. y F.J.D.Luderus: *Analysis of Multi-temporal Data for the Identification of Land Use and crops (Case Study on the Mérida Region in the Province of the Badajoz, SW Spain)*, Madrid (1982), ITC-IBM Scientific Center.
Brookes, A.J: *Photo Reconnaissance: The Operational History*, London (1975), Ian Allan.
Bruce, B. y J.K.Hormsby: *A canadian perspective on the application of satellite remote sensing to regional geobotany*, "Geocarto International", vol. 1 (1987), pp. 53-59.
Bruneau, M. y B.Gautier: *Cartographie diachronique de l'occupation du sol en milieu tropical densement peuple (Thailande)*, 4eme Coll. Inter. du GDTA, Toulousse (1981), pp. 230-240.
Bullard, R.K. y R.W.Dixon-Gough: *Britain from Space. An Atlas of Landsat Images*, London (1985), Taylor & Francis Ltd.
Burrough, P.A: *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*, Oxford (1986), Clarendon Press.
Byrne, G.F., P.F.Crapper y K.K.Mayo: *Monitoring land-cover change by Principal Component analysis of multitemporal Landsat Data*, "Remote Sensing of Environment", vol. 10 (1980), pp. 175-184.
Calvet, J. y R.Pascual: *Estudio de alineaciones obtenidas a partir de imágenes radar del Seasat-SAR en el macizo del Montseny-Guilleries*, II Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección, Barcelona (1987), pp. 41-47.
Campbell, J.G: *The use of Landsat MSS data for ecological mapping*, en J.G.Campbell, Ed, Matching Remote Sensing Technologies and Their Applications, London (1981), Remote Sensing Society, pp. 143-162.
Campbell, J.B: *Introduction to Remote Sensing*, New York (1987), The Guilford Press.
Carter, P. y B.Stow: *Clean-up of digital thematic maps of urban growth extracted from Landsat imagery*, en J.Allan y R.Harris, Eds, Remote Sensing and National Mapping, Reading (1979), Remote Sensing Society, pp. 27-40.
Carter, D.J: *The Remote Sensing Sourcebook*, London (1986), McCarta Ltd.
Caselles, V., S.Gandia y J.Meliá: *Significance of apparent temperature measurements carried out by the HCMM satellite over areas of vegetation*, "Agricultural Meteorology", vol. 30 (1983), pp. 77-82.
Caselles, V., S.Gandia y J.Meliá: *Use of satellites in frost forecasting: siphes*, Proc. IGARSS'84 Symposium, Strasbourg (1984), ESA, pp.461-465.
Caselles, V., J.A.Sobrino y F.Becker: *Determination of the effective emissivity and temperature under vertical observation of a citrus orchard. Application to frost nowcasting*, "International Journal of Remote Sensing", vol. 9 (1988), pp. 715-727.
Caselles, V. y J.A.Sobrino: *Determination of frosts in orange groves from NOAA-9 AVHRR Data*, "Remote Sensing of Environment", vol. 27 (1989), en prensa.
Cebrián, J.A: *Sistemas de Información Geográfica*, en J.Bosque, Ed, Aplicaciones de la Informática a la Geografía y Ciencias Sociales, Madrid (1988), Síntesis, pp. 125-140.
Cebrián, J.A. y D.Mark: *Sistemas de Información Geográfica. Funciones y Estructuras de Datos*, "Estudios Geográficos", vol. 47 (1986), pp. 277-299.

Cebrián, J.A. y D.Mark: *Gestión y perspectivas de desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica*, "Estudios Geográficos", vol. 48 (1987), pp. 359-378.

Chapelle, E.W., F.W.Wood, J.E.McMurtrey y W.W.Newcomb: *Laser-induced fluorescence of green plants. A technique for the remote detection of plant stress and species differentiation*, "Applied Optics", vol. 23 (1984), pp. 134-142.

Chavez, P.S. y A.Y.Kwarteng: *Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 55 (1989), pp. 339-348.

Chavez, P.S: *Digital merging of Landsat TM and digitized NHAP data for 1:24.000-scale image mapping*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 52 (1986), pp. 1637-1646.

Chevrel, M., M.Courtois y G.Weill: *The SPOT satellite remote sensing mission*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 47 (1981), pp. 1163-1171.

Chicharro, E: *Application of Landsat-2 data to land use mapping in Central Spain*, en R.Núñez, Ed, Thematic Mapping, Land Use, Geological Structure and Water Resources in Central Spain, Madrid (1976), NASA Project 28760, pp. 216-219.

Chuvieco, E: *Aplicaciones del Tratamiento Digital de Imágenes Landsat a la Cartografía de Ocupación del Suelo*, Madrid (1985a), Facultad de Geografía e Historia de la Universidad Complutense.

Chuvieco, E: *Aportaciones de la teledetección espacial a la cartografía de ocupación del suelo*, "Anales de Geografía de la Universidad Complutense", vol. 5 (1985b), pp. 29-48.

Chuvieco, E: *Análisis espectral, cartografía e inventario de tipos de ocupación a partir de imágenes Thematic Mapper*, "Geographica", vol.27 (1985c), pp. 117-129.

Chuvieco, E. y J.Sancho: *Tratamiento visual y digital de las imágenes espaciales: aplicaciones docentes*, "Didáctica Geográfica", vol. 14 (1986), pp. 17-28.

Chuvieco, E.: *Análisis visual multiestacional de la ocupación del suelo en Madrid y Guadalajara: propuesta de cartografía a partir de imágenes espaciales*, "Geográfica", vol. 28 (1986), avance de publicación.

Chuvieco, E. y R.G.Congalton: *Using cluster analysis to improve the selection of training statistics in classifying remotely sensed data*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 54 (1988a), pp. 1275-1281.

Chuvieco, E. y R.G.Congalton: *Mapping and inventory of forest fires from digital processing of TM data*, "Geocarto International", vol. 3 (1988b), pp. 41-53.

Chuvieco, E. y R.G.Congalton: *Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping*, "Remote Sensing of Environment", vol. 29 (1989), pp. 147-159.

Chuvieco, E. y J.Martínez: *Visual versus digital analysis for vegetation mapping: some examples on Central Spain*, "Geocarto International" (1990), en prensa.

Cicone, R. y M.D.Metzler: *Comparison of Landsat MSS, Nimbus-7 CZCS, and NOAA-7 AVHRR features for land use analysis*, "Remote Sensing of Environment", vol. 14 (1984), pp. 257-265.

Coleman, A: *Land Use Survey Handbook*, Ile of Thamet (1968), Geographical Association.

Colwell, J.E: *Vegetation canopy reflectance*, "Remote Sensing of Environment", vol. 3 (1974), pp. 175-183.

Congalton, R.G: *Using spatial autocorrelation analysis to explore the errors in maps generated from remotely sensed data*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 54 (1988a), pp. 587-592.

Congalton, R.G: *A comparison of sampling schemes used in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 54 (1988b), pp. 593-600.

Congalton, R.G. y R.A.Mead: *A quantitative method to test for consistency and correctness in photointerpretation*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 49 (1983), pp. 69-74.

Congalton, R.G., R.G.Oderwald y R.A.Mead: *Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 49 (1983), pp. 1671-1678.

Cosentino, M.J., C.E.Woodcock y J.Franklin: *Scene analysis for wildland fire-fuel characteristics in a Mediterranean climate*, Proc. 15th Inter. Symp. on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor (1981), pp. 635-646.

Crapper, P.F. y K.C.Hynson: *Change detection using Landsat photographic imagery*, "Remote Sensing of Environment", vol. 13 (1983), pp. 291-300.

Crist, E.P. y R.C.Cicone: *Comparisons of the dimensionality and feature of simulated Landsat 4 MSS and TM data*, "Remote Sensing of the Environment", vol. 14 (1984a), pp. 235-246.

Crist, E.P. y R.C.Cicone: *A physically-based transformation of Thematic Mapper data the TM tasseled cap*, "IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing", vol. GE-22 (1984b), pp. 256-263.

Curran, P: *Remote sensing systems for monitoring crops and vegetation*, "Progress in Physical Geography", vol. 4 (1980), pp. 315-341.

Curran, P.J: *Principles of Remote Sensing*, London (1985), Longman.

Cushnie, J.L. y P.Atkinson: *The effect of spatial filtering on scene noise and boundary detail in Thematic Mapper imagery*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 51 (1985), pp.1483-89.

Cushnie, J.L.: *The interactive effect of spatial resolution and degree of internal variability within land-cover types on classification accuracies*, "International Journal of Remote Sensing", vol. 8 (1987), pp. 15-29.

Dangermond, J: *Software components commonly used in Geographic Information Systems*, URISA-82, 1982, pp. 1-51.

Danjoy, W.A. y F.G.Sadowski: *Use of Landsat in the study of forest classification in the tropical jungle*, Proc. 12th Intern. Symp. Rem. Sens. of Environment, Ann Arbor (1978), pp. 947-951.

Deane, G.C: *Preliminary evaluation of Seasat-1 SAR data for land use mapping*, "Geographical Journal", vol. 146 (1980), pp. 408-418.

Dietrich, D.L. y H.M.Lachowski: *Identification and delineation of urbanized areas using Landsat data*, Proc. 12th Inter. Symp. on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor (1978), pp. 1083-1090.

Dozier, J. y A.H.Strahler: *Ground investigations in support of remote sensing*, en Colwell, Ed, Manual of Remote Sensing, 2nd. Ed., Falls Church (1983), American Society of Photogrammetry, pp. 959-986.

Duda, R.D. y P.E.Hart: *Pattern Classification and Scene Analysis*, New York (1973), John Wiley & Sons.

Duecker, K.J.: *Geographic Information Systems and Computer-aided mapping*, "Journal of the American Planning Association", vol. 53 (1987), pp. 383-390.

Ehlers, M., G.Edwards y Y.Bédard: *Integration of remote sensing with geographic information systems: A necessary evolution*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 55 (1989), pp. 1619-1627.

Elachi, C: *Radar images of the Earth from space*, "Scientific American", vol. 247 (1982), pp. 46-53.

Elachi, C: *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing*, New York (1987), John Wiley & Sons.

EOSAT: *Landsat Products and Services*, Lanham (1988), Earth Observation Satellite Company.

ESA-EARTHNET: *Landsat Thematic Mapper CCT Format Standards*, Fucino (1984), ESA.

ESRI: *pcARC/INFO User's Guide*, Redlands (1987), Environmental Systems Research Institute.

Estes, J.E. y D.S.Simonett: *Fundamentals of image interpretation*, en R.G.Reeves, Ed, Manual of Remote Sensing, 1st. Ed., Falls Church (1975), American Society of Photogrammetry, pp. 869-1076.

Eyton, J.R: *Landsat multitemporal color composites*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 49 (1983), pp. 231-235.

Fitzpatrick-Lins, K: *Accuracy and consistency comparisons of land use and land cover maps made from high-altitude photographs and Landsat multispectral imagery*, "Journal Research U.S. Geological Survey", vol. 6 (1978), pp. 23-40.

Flannigan, M.D. y T.H.Vonder Haar: *Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR*, "Canadian Journal of Forest Research", vol. 16 (1986), pp. 975-982.

Francis, P. y P.Jones: *Images of Earth*, London (1984), George Phillip.

Franklin, J, T.L.Logan, C.E.Woodcock y A.H.Strahler: *Coniferous forest classification and inventory using Landsat and digital terrain data*, "IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing", vol. GE-24 (1986), pp. 139-149.

García, E., R.P.Bradshaw y M.C.Ocaña: *Análisis de los usos del suelo en la depresión de Antequera mediante la utilización del TM*, I Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección, Barcelona (1986), pp. 31-50.

Gates, D.M., H.J.Keegan, J.C.Schleter y V.R.Weidner: *Spectral properties of plants*, "Applied Optics", vol. 4 (1965), pp. 11-20.

GDTA-CEE: *Recherche sur la Cartographie de l'Occupation des Sols par Teledetection*, Paris (1982), IGN Département de Télédétection et de Cartographie Spatiale.

Gilabert, A., S.Gandia, D.Segarra y J.Meliá: *Análisis multitemporal de los valores de reflectividad en cultivos de cítricos mediante el sensor TM*, Barcelona (1986), I Reunión Científico del Grupo de Trabajo en Teledetección, pp. 237-250.

Ginevan, M.E: *Testing land-use map accuracy: another look*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 45 (1978), pp. 1371-1377.

Girard, C.M: *Grassland mapping using satellite multitemporal data*, en C.M.Girard, Ed, Matching Remote Sensing Technologies and their Applications, London (1981), pp. 111-122.

Goetz, A.F.H, Ed: *HIRIS. A high-resolution imaging spectrometer: Sciene oportunities for the 1990's*, Washington (1987), NASA EOS Instrument Panel Report.

Gonzalez, R.C. y P.Wintz: *Digital Image Processing*, Reading (1977), Addison & Wesley.

Gordon, D.K. y R.Philipson: *A texture-enhancement procedure for separating orchard from forest in Thematic Mapper data*, "International Journal of Remote Sensing", vol. 7 (1986), pp. 301-304.

Gordon, S.I: *Utilizing Landsat imagery to monitor land use change: a case study in Ohio*, "Remote Sensing of Environment", vol. 9 (1980), pp. 189-196.

Goward, S: *Satellite bioclimatology*, "Journal of Climate", vol. 2 (1989), pp. 710-720.

Goward, S.N., D.Dye, A.Kerber y V.Kalb: *Comparison of North and South American biomes from AVHRR observations*, "Geocarto Internacional", vol. 1 (1987), pp. 27-39.

Haack, B.N: *An analysis of Thematic Mapper simulator data for urban environments*, "Remote Sensing of Environment", vol. 13 (1983a), pp. 265-275.

Haack, B., N.Bryant y S.Adams: *An assessment of Landsat MSS and TM data for urban and near-urban land-cover digital classification*, "Remote Sensing of Environment", vol. 21 (1987), pp. 201-213.

Haefner, H: *Data collection by remote sensing and other methods*, Europen Seminar Reg. Planning and Rem.Sens., Toulousse (1977), pp. 78-98.

Hall, R.J., P.H.Crown y S.J.Titus: *Change detection methodology for aspen defoliation with landsat MSS digital data*, "Canadian Journal of Remote Sensing", vol. 10 (1984), pp. 135-142.

Hall, D.K. y J.Martinec: *Remote Sensing of Ice and Snow*, London (1985), Chapman and Hall.

Hand, D.J: *Discrimination and Classification*, New York (1981), John Wiley and Sons.

Harnapp, V: *Landsat imagery: a tool for updating land use in Gulf Coast Mexico*, "Journal of Geography", vol. 78 (1978), pp. 141-144.

Harris, R: *Satellite Remote Sensing. An Introduction*, London (1987), Routledge Kegan Paul.

Hart, W.G: *The use of Skylab data to study the early detection of insect infestations and density and distribution of host plants*, "NASA Earth Resources Survey Symposium", vol. I-A (1975), pp. 203-220.

Hay, A.M: *Sampling designs to test land-use map accuracy*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 45 (1979), pp. 529-533.

Heilman, J., E.Kanemasu, N.Rosenburg y B.Blad: *Thermal scanner measurement of canopy temperatures to estimate evapotranspiration*, "Remote Sensing of Environment", vol. 5 (1976), pp. 137-145.

Henderson, R.M: *A comparison of SAR brightness levels and urban land-cover classes*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 49 (1983), pp. 1585-1591.

Hervás, J: *La utilidad de análisis de componentes principales en cartografía litológica. Su aplicación a imágenes landsat-TM y MSS del macizo ultrabásico de Ronda*, II Reunión Nacional Grupo Trabajo Teledetección, Valencia (1987), pp. 50-52.

Hilwig, F.W: *Visual interpretation of multitemporal Landsat data for inventories of natural resources*, "ITC Journal", vol. 2 (1980), pp. 297-327.

Hixson, M., D.Scholz, N.Fuhs y T.Akiyama: *Evaluation of several schemes for classification of remotely sensed data*, "Photogrammetric

Engineering and Remote Sensing", vol. 46 (1980), pp. 1547-1553.

Hoffer, R.M. y M.D.Fleming: *Mapping vegetative cover by computer-aided analysis of satellite data*, Purdue (1978), LARS Technical Report.

Hoffer, R.M. y P.H.Swain: *Computer processing of satellite data for assessing agriculture, forest, and rangeland resources*, Proc. 14th Intern. Soc. of Photog., Hamburg (1980), pp. 437-446.

Hoge, F.E., R.N.Swift y J.K.Yungel: *Feasibility of airborne detection of laser-induced fluorescence emissions from green terrestrial plans*, "Applied Optics", vol. 22 (1983), pp. 2991-98.

Hopkins, P.F., A.L.Maclean y T.M.Lillesand: *Assessments of Thematic Mapper imagery for forestry applications under lake states conditions*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 54 (1988), pp. 61-68.

Hord, R.M. y W.Brooner: *Land use map accuracy criteria*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 42 (1976), pp. 671-677.

Hord, R.M: *Remote Sensing. Methods and Applications*, New York (1986), John Wiley and Sons.

Howarth, P.J. y G.M.Wickware: *Procedures for change detection using Landsat digital data*, "International Journal of Remote Sensing", vol. 2 (1981), pp. 277-291.

Hudson, W.D. y C.W.Ramn: *Correct formulation of the kappa coefficient of agreement*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 53 (1987), pp. 421-422.

Huete, A.R: *Spectral signatures and vegetation indices*, II Reunión Nac. del Grupo de Trabajo en Teledetección, Valencia (1987), pp. 13-26.

Huffaker, R.M., T.R.Lawrence, M.J.Post, J.T.Priestley, F.F.Hall, R.A.Richter y R.J.Keller: *Feasibility studies for a global wind measuring satellite system (Wyndsat). Analysis of simulated perfomance*, "Applied Optics", vol. 23 (1984), pp. 2523-34.

Hutchinson, C.F: *Techniques for combining Landsat and ancillary data for digital classification improvement*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 48 (1982), pp. 123-130.

Hyatt, E: *Keyguide to Information Sources in Remote Sensing*, London (1988), Mansell.

Irons, J.R. y R.L.Kennard: *The utility of Thematic Mapper sensor characteristics for surface mine monitoring*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 52 (1986), pp. 389-396.

Itten, K.I., K.Staenz, M.F.Baumgartner y T.Johnson: *A stepwise hierarchical multibinary approach in TM land use classification*, Intern. Geoscience and Rem. Sens. Symp. IGARSS'85, Amherst (1985), pp. 697-702.

Jensen, J.R: *Spectral and textural features to classify elusive land cover at the urban fringe*, "The Professional Geographer", vol. 31 (1979a), pp. 400-409.

Jensen, J.R: *Byophysical remote sensing*, "Annals of the Association of American Geographers", vol. 73 (1983), pp. 111-132.

Jensen, J.R: *Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective*, Englewood Cliffs (1986), Prentice-Hall.

Jensen, J.R. y D.L.Toll: *Detecting residential land-use development at the urban fringe*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 48 (1982), pp. 629-643.

Jensen, J.R., P.J.Pace y E.J.Christensen: *Remote sensing temperature mapping: the thermal plume example*, "The American Cartographer", vol. 10 (1983), pp. 111-127.

Jiménez, J. y N.García: *Introducción al Tratamiento Digital de Imágenes*, Madrid (1982), Centro de Investigación UAM-IBM.

Johnston, R.J.: *Multivariate Statistical Analysis in Geography*, London (1978), Longman.

Joly, G., F.Verger y J.P.Crettez: *Classification des donées Landsat unitemporelles et multitemporelles par la transformation de Karhunen-Loève. Application à l'Anse de l'Aiguillon*, "L'Espace Géographique", vol. 2 (1983), pp. 125-141.

Justice, C.O. y J.R.G.Townshend: *Integrating ground data with remote sensing*, en J.R.G.Townshend, Ed, Terrain Analysis and Remote Sensing, London (1981), George Allen & Unwin, pp. 38-58.

Justice, C.O., J.R.G.Townshend, B.N.Holben y C.J.Tucker: *Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data*, "International Journal of Remote Sensing", vol. 6 (1985), pp. 1271-1318.

Kauth, R.J. y G.S.Thomas: *The Tasseled Cap. A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat*, Proc. Symp. on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue (1976), pp. 41-51.

Ketting, R.L. y D.A.Landgrebe: *Classification of multispectral image data by extraction and classification of homogeneous objects*, Proc. Symposium on Machine Classification of Remotely Sensed Data, Purdue (1975), pp. 1-11.

Kiefer, R.W: *The 1988 ASPRS survey of photogrammetry and remote sensing programs and courses in the United States and Canada*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 55 (1989), pp. 114-121.

King, R.B: *An evaluation of Landsat-3 RBV imagery for obtaining environmental information in Tanzania*, Matching Remote Sensing Technologies and their Applications, London (1981), pp. 85-95.

Kleckner, R.L: *Classification systems for natural resource management*, Proc. Pecora VII Symposium, Sioux Falls (1982), pp. 65-70.

Knipling, E.B: *Physical and Physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation*, "Remote Sensing of Environment", vol. 1 (1970), pp. 155-159.

Kobayashi, T: *Techniques for laser remote sensing of environment*, "Remote Sensing Reviews", vol. 3 (1987), pp. 1-57.

Konecny, G: *First Results of the European Spacelab Photogrammetric Camera Mission*, en K.H.Szekielda, Ed, Satellite Remote Sensing for Resources Development, London (1986), Graham and Trotman, pp. 115-121.

Koopmans, B.N: *Spaceborne imaging radars, present and future*, "ITC Journal", vol. 83/3 (1983), pp. 223-231.

Kumar, R. y L.F.Silva: *Separability of agricultural cover types by remote sensing in the visible and infrared wavelength regions*, "IEEE Transactions on Geoscience Electronics", vol. 15 (1977), pp. 49-59.

Labrandero, J.L: *Aplicación de Métodos Digitales al Reconocimiento de Suelos Mediante Sensores Remotos*, Madrid (1978), Tesis Doctoral, Univ. Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias.

Lachowski, H.M. y D.L.Dietrich: *Landsat assisted forest inventory of the Philippine Islands*, Proc. 12th Intern. Symp. Rem. Sen. of Environment, Ann Arbor (1978), pp. 1401-1405.

Lee, T. y J.A.Richards: *A low-cost classifier for multitemporal applications*, "International Journal of Remote Sensing", vol. 6 (1985), pp. 1405-1418.

Lillesand, T.M. y R.W.Kiefer: *Remote Sensing and Image Interpretation*, 2nd Ed., New York (1987), John Wiley and Sons.

Links, H.F: *Land-use mapping from Skylab S190B photography*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 42 (1976), pp. 301-307.

Link, L.E. y H.Struve: *Problems and concepts in remote sensing of land use*, Proc. 12 th. Inter. Symp. on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor (1978), pp. 1073-1079.

Llop, R., F.González, J.M.Cuevas y S.López: *Utilización de los datos SIR-A para el reconocimiento de los usos del suelo en la región centro española*, I Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección, Barcelona (1987), pp. 115-137.

Lloyd, D: *A phenological description of Iberian vegetation using short wave vegetation index imagery*, "International Journal of Remote Sensing", vol. 10 (1989), pp. 827-833.

Lo, C.P.: *Applied Remote Sensing*, New York (1986), Longman.

Lo, C.P. y R.Welch: *Chinese urban population estimates*, "Annals Association of American Geographers", vol. 47 (1977), pp. 246-253.

Lo, T.H.C., F.L.Scarpace y T.M.Lillesand: *Use of multitemporal*

spectral profiles in agricultural land-cover classification, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 52 (1986), pp. 535-544.
Loomer, S.A.: *Landsat User's Guide*, West Point (1987), autor.
López, M.J. y V.Caselles: *A multi-temporal study of chlorophyll A concentration in the Albufera lagoon of Valencia, Spain, using Thematic Mapper data*, "International Journal of Remote Sensing", vol. 11 (1989), pp. 301-311.
López, S., F.González, R.Llop y J.M.Cuevas: *Utilización de imágenes del satélite NOAA-AVHRR para la predicción de las zonas más susceptibles de sufrir incendios forestales*, Madrid (1989), III Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección, en prensa.
López-Vizoso, J.M: *Aplicaciones del Tratamiento de Imagenes Espaciales de Alta Resolución a los Estudios de Ordenación del Territorio en Galicia*, Santiago de Compostela (1989), Tesis Doctoral, Universidad de Santiago, Facultad de Geografía e Historia.
Lulla, K: *Some observations on geobotanical remote sensing and mineral prospecting*, "Canadian Journal of Remote Sensing", vol. 11 (1985), pp. 17-38.
Malingreau, J.P. y C.J.Tucker: *The contribution of AVHRR data for measuring and understanding global processes: Large-scale deforestacion in the Amazon basin*, Proc. IGARS'87, Ann Arbor (1987), pp. 443-448.
Marble, D.F: *Geographic information systems: An overview*, Pecora IX Proc. Spatial Information Tech. for Rem. Sen. Today and Tomorrow, Sioux Falls (1984), pp. 18-24.
Markham, G.L. y J.R.G.Townshend: *Land cover classification accuracy as a function of sensor spatial resolution*, Proc. 15th Intern. Symp. Rem. Sens. of Environment, Ann Arbor (1981), pp. 1075-1090.
Martínez, J.: *Aplicación de la Teledetección a la Cartografía del medio ambiente: Transformaciones del paisaje agrario*, Madrid (1989), Tesis Doctoral, Facultad de Geografía e Historia de la Univesidad Complutense.
Marx, C. y G.Hildebrandt: *Qualitative and quantitative interpretation of Landsat MSS data to forest cover mapping in Germany*, Proc. Int. Symp. Rem. Sens. Obs. Invent. of Earth Resources, Freiburg (1978), pp. 1791-1804.
Mather, P.M: *Computer Processing of Remotely Sensed Images*, Chichester (1987), John Wiley.
Matson, M. y B.Holben: *Satellite detection of tropical burning in Brazil*, "International Journal of Remote Sensing", vol. 8 (1987), pp. 509-516.
Measures, R.M: *Laser Remote Sensing*, New York (1984), John Wiley.
Meijerink, A.H.J. y N.H.W.Donker: *The ITC approach to digital processing applied to land use mapping in the Himalayas and Central*

Java, en Collins, Van Genderen, Eds, Remote Sensing Applications in Developing Countries, Reading (1978), pp. 75-83.
Meliá, J: *Signaturas Espectrales e Indices de Vegetación*, Burjassot (1986), Facultad de Ciencias Físicas U. Valencia.
Meliá, J., S.Gandia y V.Caselles: *Teledetección y signaturas espectrales*, "Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales", vol. 80 (1986), pp. 177-185.
Meliá, J. y J.A.Sobrino: *A study on the utilization of SIR-A data for population estimation in the Eastern part of Spain*, "Geocarto Internatio-nal", vol. 2 (1987), pp. 33-38.
Mergerson, J.W: *Crop area estimates using ground gathered and Landsat data: A multitemporal approach*, Proc. 15th Intern. Symp. Rem. Sens. of Environment, Ann Arbor (1981), pp. 1211-1218.
Merideth, R.W. y A.B.Sacks: *Education in environmental remote sensing: A bibliography and characterization of doctoral dissertations*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 52 (1986), pp. 349-365.
Miller, L.D., K.Nualchawee y C.Tom: *Analysis of the dynamic of shifting cultivation in the tropical forest of Northern Thailand using landscape modeling and classification of Landsat imagery*, Proc. 12th Int. Symp. Rem.Sen. of Environment, Ann Arbor (1978), pp. 1167-1174.
Miller, L.D. y D.L.Williams: *Monitoring forest canopy alteration around the world with digital analysis of Landsat imagery*, Proc. Int. Symp. Rem. Sens. Obs. Invent. of Earth Resources, Freiburg (1978), pp. 1721-1763.
Milton, N.M., W.Collins, S.H.Chang y R.G.Schmidt: *Remote detection of metal anomalies on Pilot Mountain, Randolph County, North Carolina*, "Economic Geology", vol. 78 (1983), pp. 605-617.
Moore, G.K. y F.A.Waltz: *Objective procedures for lineament enhancement and extraction*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 49 (1983), pp. 641-647.
Morain, S.A. y B.Klankamsorn: *Forest mapping and inventory techniques through visual analysis of Landsat imagery. Examples from Thailand*, Proc. 12th Int. Symp. Rem.Sen. of Environment, Ann Arbor (1978), pp. 417-426.
Mulders, M.A: *Remote Sensing in Soil Science*, Amsterdam (1987), Elsevier.
Muller, J.P: *Computing issues in digital image processing in remote sensing*, en J.P.Muller, Ed, Digital Image Processing in Remote Sensing, London (1988), Taylor & Francis, pp. 1-20.
Murtha, P.A: *Remote sensing and vegetation damage: a theory for detection and assessment*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 44 (1978), pp. 1147-1158.

Mussakowski, R.S: *Revising agricultural land use maps by digital change detection on Landsat data*, ASPRS 51st Annual Meeting, Tech. Papers, Washington (1985), pp. 312-319.

NASA: *Landsat Data Users Handbook*, Greenbelt (1976), Goddard Space Flight Center.

NASA: *Skylab Explores the Earth*, Washington (1977), NASA SP380.

NASDA: *Earth Observation from Space*, Tokyo (1987), Earth Observation Center.

Nelson, R. y G.Grebowsky: *Evaluation of temporal registration of landsat scenes*, "International Journal of Remote Sensing", vol. 3 (1982), pp. 45-50.

Nelson, R., N.Horning y T.Stone: *Determining the rate of forest conversion in Mato Grosso, Brazil, using Landsat MSS and AVHRR data*, "International Journal of Remote Sensing", vol. 8 (1987), pp. 1767-1784.

Nikolaus, S: *Visual and digital classification of Landsat TM data for soil, phisiography and land use mapping in Axios alluvial plain, Thessaloniki, Greece*, "Geocarto International", vol. 4 (1988), pp. 55-66.

Núñez, R., Ed.: *Thematic Mapping, Land Use, Geological Structure and Water Resources in Central Spain*, Madrid (1976), NASA Project 28760.

Núñez, R., Ed.: *Thermal Mapping. Geothermal Source Location, Natural effluents and Plant Stress in the Mediterranean Coast of Spain*, Madrid (1980), NASA HCM-034.

Núñez, R., E.Chuvieco, J.Sancho, F.Palou y J.M.Casas: *Mapa de Usos del Suelo de la Región Central. Estudio piloto sobre la aplicación del tratamiento digital de imágenes Landsat a la confección de mapas de usos del suelo*, "Geographica" (1983), vol. 25, pp. 61-78.

Olorunfemi, J.F: *Identification and measurement of the areal extent settlements from Landsat*, "International Journal of Remote Sensing", vol. 8 (1987), pp. 1839-1843.

OTA: *Remote Sensing and the Private Sector: Issues for Discussion. A Technical Memorandum*, Washington, D.C. (1984), U.S. Congress, Office of Technology Assessment.

Owe, M. y J.Ormsby: *Improved classification of small scale urban watersheds using Thematic Mapper simulator data*, "International Journal of Remote Sensing", vol. 5 (1984), pp. 761-767.

Parker, H.D: *GIS software 1989: A survey and commentary*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 55 (1989), pp. 1589-1591.

Parry, D.E. y J.W.Trevett: *Mapping Nigeria's vegetation from radar*, "Geographical Journal", vol. 145 (1979), pp. 265-281.

Perry, C.R. y L.F.Lautenschlager: *Functional equivalence of spectral vegetation indices*, "Remote Sensing of Environment", vol. 14 (1984), pp. 169-182.

Pierce, L.L. y R.G.Congalton: *A methodology for mapping forest latent heat flux densities using remote sensing*, "Remote Sensing of Environment", vol. 24 (1988), pp. 405-418.

Rebollo, M. y F.Orti: *Pattern Recognition Techniques: Remote Sensing Applications at Centro de Investigación UAM-IBM*, Madrid (1980), Centro de Investigación UAM-IBM.

Renz, A.N: *Multitemporal analysis of Landsat imagery for monitoring forest cutovers in Nova Scotia*, "Canadian Journal of Remote Sensing", vol. 11 (1985), pp. 189-194.

Richards, J.A: *Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction*, Berlin (1986), Springer-Verlag.

Robinove, C: *Integrated Terrain Mapping with Digital Landsat Images in Queensland, Australia*, Washington (1979), Geological Survey Prof. Paper 1102.

Robinove, C.: *The logic of multispectral classification and mapping the land*, "Remote Sensing of Environment", vol. 11 (1981), pp. 231-244.

Robinove, C.: *Computation with Physical Values from Landsat*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 48 (1982), pp. 781-784.

Robinson, I.S: *Satellite Oceanography. An Introduction for Oceanographers and Remote Sensing Scientist*, Chichester (1985), John Wiley.

Rosenfeld, G.H: *Sample design for estimating change in land use and land cover*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 48 (1982), pp. 793-801.

Sadar, S.A., D.S.Linden y M.McGuire: *Fuels mapping from Landsat imagery and digital terrain data for fire supression decisions*, Proc. ACSM-ASP Congress, Fort Lauderdale (1982), pp. 345-351.

Sagdejew, R.S: *Atlas Zur Interpretation Aerokosmischer Multispektralaufnahmen*, Berlin (1982), Akademie Verlag y Mosku Verlag Nauka.

Sancho, J. y E.Chuvieco: *Castellón desde el Espacio*, Castellón (1986), Caja de Ahorros de Castellón de la Plana.

Scanvic, J.Y.: *Utilisation de la Télédétection dans les Sciences de la Terre*, Paris (1983), Bureau de recherces géologiques et miniéres (Traducción española, Madrid (1989), Editorial Paraninfo).

Schneider, D.M: *Computer Assisted Land Resources Planning*, Washington, D.C. (1979), Planning Advisory Service Report 339.

Schneider, S: *Interpretation of satellite imagery for determination of land use data*, "International Journal of Remote Sensing", vol. 1 (1980), pp. 85-90.

Schowengerdt, R.A: *Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing*, New York (1983), Academic Press.

Schreier, H., L.C.Goodfellow y L.M.Lavkulich: *The use od digital multi-date Landsat imagery in terrain classification*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 48 (1982), pp. 111-119.

Schroeder, M: *Spacelab Metric Camera Experiments*, en K.H.Szekielda, Ed, Satellite Remote Sensing for Resources Development, London (1986), Graham and Trotman Ltd, pp. 81-92.

Schultink, G., S.Nair, W.Enslin, B.Buckley, J.Chen, D.Brown, S.W.Chen y B.Parks: *Comprehensive Resource Inventory and Evaluation System (CRIES) Project*, East Lansing (1988), Michingan State University.

Sellman, A.N: *Computer Analysis on Classification of Landsat Data for Land Cover of Selected Test Sites in the Dominican Republic*, Washington (1977), Draft Report to the Econ. Research Service, U.S.A.I.D..

Sheffield, C: *Earth Watch. A Survey of the World from Space*, London (1981), Sidgwick and Jackson Ltd.

Sheffield, C: *Man on Earth. The Marks of Man. A Survey from Space*, London (1983), Sidgwick and Jackson Ltd.

Sheffield, C.: *Selecting band combinations from multispectral data*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 51 (1985), pp. 681-687.

Short, N.M: *The Landsat Tutorial Workbook: Basics of Satellite Remote Sensing*, Washington, D.C. (1982), NASA Scientific and Technical Information Branch.

Sicco, G: *Use of Landsat imagery for forest management*, "ITC Journal", vol. 3 (1980), pp. 563-575.

Slater, P.N: *Remote Sensing. Optics and Optical Systems*, Reading, MA (1980), AddisonWesley.

Smith, R.M: *Images of the World. An Atlas of Satellite Imagery and Maps*, Essex (1984), Collins-Longman.

Sobrino, J.A., V.Caselles y F.Becker: *Significance of the remotely sensed thermal infrared measurements obtained over a citrus orchard*, "ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing", vol. 44 (1990), pp. in-pp.

Story, M.H. y J.B.Campbell: *The effect of training data on classification accuracy*, "ACSM-ASPRS Convention. Technical Papers", vol. 4 (1986), pp. 370-379.

Story, M. y R.G.Congalton: *Accuracy assessment: A user's perspective*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 52 (1986), pp. 397-399.

Strahler, A.H: *The use of prior probabilities in maximun likelihood classification of remotely sensed data*, "Remote Sensing of Environment", vol. 10 (1980), pp. 135-163.

Strahler, A.H: *Timber inventory using Landsat*, 8th Canadian Symposium on Remote Sensing, Quebec (1984), CJRS, pp. 665-674.

Strahler, A.H. y T.L.Logan: *Improving forest cover classification accuracy from Landsat by incorporing topographic information*, Proc. 12th Intern. Symp. Rem. Sens. of Environment, Ann Arbor (1978), pp. 927-942.

Swain, P.H. y S.M.Davis, Eds.: *Remote Sensing: The Quantitative Approach*, New York (1978), McGraw-Hill.

TYDAC Techn.: *SPANS User's Guide*, Montreal (1988), Tydac Technologies.

Tapia, L: *Derecho espacial y programas de observación de la Tierra*, en R.Núñez, Ed, La Observación de la Tierra desde el Espacio, Santander (1989), Univ. Menéndez Pelayo, pp. 1-15.

Tarpley, J.D., S.R.Schneider y R.L.Money: *Global vegetation indices from the NOAA-7 meteorological satellites*, "Journal of Climate and Applied Meteorology", vol. 23 (1984), pp. 491-494.

Terhalle, U. y J.Bodechtel: *Landsat TM data enhancement technique for mapping arid geomorphic features*, Mapping from Modern Imagery, Edinburg (1986), pp. 725-729.

Thomas, I.L: *Spatial post-processing of spectrally-classified Landsat data*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 46 (1980), pp. 1201-1206.

Thomas, I.L., V.M.Benning y N.P.Ching: *Classification of Remotely Sensed Images*, Bristol (1987), Adam Hilger.

Tindal, M.A: *Educator's Guide for Mission to Earth: Landsat Views the World*, Greenbelt, Maryland (1978), NASA, Goddard Space Flight Center.

Todd, W.J., D.G.Gehring y J.F.Haman: *Landsat wildland mapping accuracy*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 46 (1980), pp. 509-520.

Togliatti, G: *LFC: The second generation photogrammetric camera for space photography*, "Abstracs ESA/EaRSEL Symposium on Europe from Space", Paris (1986), ESA-SP 25.

Toll, D.L: *An evaluation of simulated Thematic Mapper data and Landsat MSS data for discriminating suburban and regional land use and land cover*, "Photogrammetric Engineering and Remote Sensing", vol. 50 (1984), pp. 1713-1724.

Tomlin, D.: *The IBM personal computer version of the MAP Analysis Package*, Cambridge (1987), Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis, Harvard Graduate Schoold of Design.

Townshend, J.R.G., C.O.Justice y V.Kalb: *Characterization and classification of South American land cover types using satellite data*, "International Journal of Remote Sensing", vol. 8 (1987), pp. 1189-1207.

Townshend, J. y C.Justice: *Information extraction from remotely ensed data. A user view*, "International Journal of Remote Sensing", vol. (1981), pp. 313-329.

Townshend, J.R.G: *The spatial resolving power of Earth resources atellites: a review*, Goddard Spaceflight Center, MA (1980), NASA 'ech. Memorandum 82020.

Townshend, J.R.G, Ed.: *Terrain Analysis and Remote Sensing*, .ondon (1981), George Allen and Unwin.

Trevett, J.W.: *Imaging Radar for Resources Surveys*, London (1986), :hapman and Hall.

Tricart, J: *Géomorphologie et quaternaire d'apres une image R.B.V.: La allee du Sénégal entre Bogué et Podor (Senegal, Mauritanie)*, "Annales e Géographie", vol. 90 (1981), pp. 284-310.

Trolier, L.J. y W.R.Philipson: *Visual analysis of Landsat Thematic fapper images for hydrologic land use and cover*, "Photogrammetric :ngineering and Remote Sensing", vol. 52 (1986), pp. 1531-1538.

Tsuchiya, K., K.Arai y T.Igarashi: *Marine observation satellite*, Remote Sensing Reviews", vol. 3 (1987), pp. 59-103.

Tucker, C.J., B.N.Holben y T.E.Goff: *Intensive forest clearing in :ondonia, Brazil, as detected by satellite remote sensing*, "Remote ensing of Environment", vol. 15 (1984), pp. 255-261.

Tucker, C.J., J.R.G.Townshend y T.E.Goff: *African land-cover lassification using satellite data*, "Science", vol. 227 (1985), pp. 369-375.

Tucker, C.J: *Red and photographic infrared linear combinations for ionitoring vegetation*, "Remote Sensing of Environment", vol. 18 (1979), p. 127-150.

Tuckey, J.W.: *Exploratory Data Analysis*, Reading (1977), Addison-'esley.

Van Genderen, J.L: *Guidelines for using Landsat data for rural land se surveys in developing countries*, "ITC Journal", vol. 1 (1978), pp. 0-49.

Verdin, J.P: *Monitoring water quality conditions in a large western eservoir with Landsat imagery*, "Photogrammetric Engineering and emote Sensing", vol. 51 (1985), pp. 343-353.

Wagner, H.L. y G.H.Suits: *A low cost classification algorithm for eveloping countries*, en User's Guide to RIPS, Washington (1983), péndice B, pp. 1525-1529.

Wastenson, L., W.Arnberg, L.Boresjö y M.Imse: *Computer analysis of ultitemporal Landsat data for mapping of land use forest clearcuts and ines*, Matching Remote Sensing Technologies and their applications, 'est Lafayette (1981), pp. 375-396.

Welch, R.: *Monitoring urban population and energy utilization from tellite data*, Remote Sensing of Environment", vol. 3 (1980), pp. 1-9.

Welch, R.: *Spatial resolution requirements for urban studies*, "International Journal of Remote Sensing", vol. 3 (1982), pp. 139-146.

Welch, R. y E.L.Usery: *Cartographic accuracy of Landsat-4 MSS and TM image data*, "IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing", vol. GE-22, pp. 281-288.

Woldai, T: *Landsat and SIR-A interpretation of the Kalpin Chol and Chong Korum mountains of China*, "ITC Journal", vol. 83/3 (1983), pp. 250-252.

Wu, S.T: *An improvement in land cover classification achieved by merging microwave data with Landsat multispectral scanner data*, "Photo-Interpretation", vol. 80-4 (1980), pp. 1-18.

Yates, H.W: *The role of meteorological satellites in agricultural remote sensing*, "Remote Sensing of Environment", vol. 14 (1984), pp. 219-233.

